



普通高等教育“十三五”规划教材——应用热工学系列

应用燃烧学

主 编 李爱琴

副主编 熊 燕 俞接成



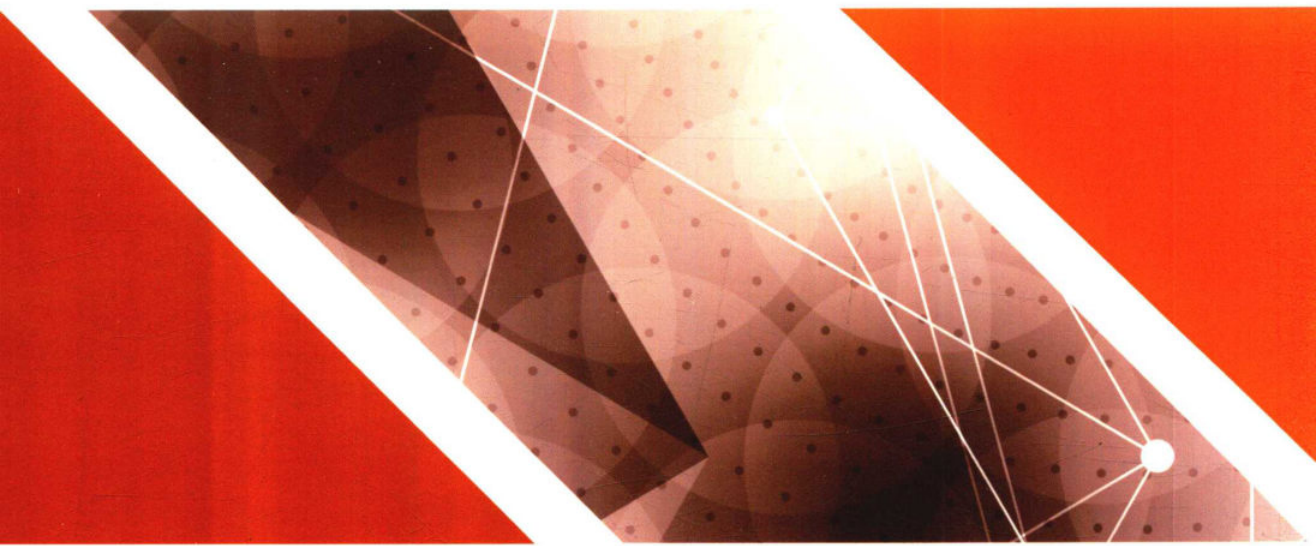
中国石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

责任编辑：孙莹许倩

责任校对：李伟

封面设计：五色空间



- 应用传热学
- 应用工程热力学
- 应用燃烧学

064307
367



扫码获取更多信息



定价：35.00元

普通高等教育“十三五”规划教材——应用热工学系列

应用燃烧学

主 编 李爱琴
副主编 熊 燕 俞接成

中国石化出版社

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十三五”规划教材——应用热工学系列之一，主要介绍了燃料的基本性质、燃烧的基本原理、燃烧设备的基本工作过程、燃烧数值模拟以及燃烧污染控制等方面相关的专业知识。

本书适合作为能源与动力工程类本科专业 32~40 学时的应用燃烧学教材，也可以作为职业院校学生及其他相关人员的参考用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

应用燃烧学 / 李爱琴主编. —北京: 中国石化出版社, 2019. 7

普通高等教育“十三五”规划教材. 应用热工学系列
ISBN 978-7-5114-5395-2

I. ①应… 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 132552 号

未经本社书面授权，本书任何部分不得被复制、抄袭，或者以任何形式或任何方式传播。版权所有，侵权必究。

中国石化出版社出版发行

地址:北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编:100011 电话:(010)57512500

发行部电话:(010)57512575

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail:press@sinopec.com

北京富泰印刷有限责任公司印刷

全国各地新华书店经销

*

787×1092 毫米 16 开本 10 印张 240 千字

2019 年 7 月第 1 版 2019 年 7 月第 1 次印刷

定价: 35.00 元

前言 Preface

应用燃烧学是能源与动力工程专业的一门专业选修课。能源与动力工程专业是重基础、宽口径的专业，能够为我国石化、电力、能源和暖通等行业输送从事热工设备、动力工程、暖通空调、热电冷联产、新能源及节能技术的设计、制造、运行、管理、营销等方面工作的应用型高级工程技术人才。鉴于此，作者根据能源与动力工程专业应用燃烧学课程教学大纲编写了本书。

由于各行各业中使用的燃料多种多样，涉及的燃烧问题十分广泛，为适应各方面的需要，本书着重阐述了固体、液体和气体燃料的燃料特性以及它们燃烧的基本规律，并在此基础上介绍工程中各种典型的燃烧技术和燃烧设备、燃烧数值模拟、燃烧污染及控制方面的知识。书中内容较为全面，适用性比较广。

本书的绪论、第1~4章及第6章由李爱琴编写，第5章由熊燕编写，附录由俞接成编写。全书由李爱琴统稿，俞接成对本书的编写提出了许多宝贵意见，对书稿的完善给予了很大的帮助。本书在编写过程中也得到相关院校领导和教师的大力帮助，在此表示衷心感谢。

由于编者水平有限，加之当今实验技术及数值模拟技术的快速发展，书中错误或不妥之处在所难免，恳请读者批评指正。

目录

绪论	(1)
1 燃料	(4)
1.1 固体燃料	(4)
1.1.1 煤的工业分析	(6)
1.1.2 固体燃料的化学组成成分及含量	(9)
1.1.3 固体燃料组成的表示方法	(11)
1.1.4 燃料的发热量	(14)
1.1.5 煤的使用性能	(16)
1.2 液体燃料	(17)
1.2.1 石油的一般性状及化学组成	(17)
1.2.2 石油的加工方法	(18)
1.2.3 液体燃料分类	(19)
1.2.4 液体燃料的物理性质	(21)
1.3 气体燃料	(24)
1.3.1 天然气	(25)
1.3.2 人造煤气	(26)
1.3.3 气体燃料的成分表示方法及发热量	(29)
作业题	(30)
2 燃料燃烧计算	(31)
2.1 空气需要量和燃烧产物生成量的计算(完全燃烧)	(31)
2.1.1 固体和液体燃料空气需要量和燃烧产物生成量的计算	(32)
2.1.2 气体燃料空气需要量和燃烧产物生成量的计算	(38)
2.2 不完全燃烧的燃烧产物	(41)
2.3 燃烧温度	(44)
2.3.1 实际燃烧温度	(44)
2.3.2 理论燃烧温度	(45)
2.3.3 燃料的理论热量计温度	(50)
2.4 烟气的分析计算	(53)
2.4.1 燃烧产物气体成分的测定和验证	(54)
2.4.2 空气消耗系数的检测计算	(57)
2.4.3 不完全燃烧的热损失计算	(59)
作业题	(61)

3 燃烧理论基础	(63)
3.1 气体射流的混合过程.....	(63)
3.1.1 静止气体中的自由射流.....	(63)
3.1.2 同向平行流中的自由射流.....	(65)
3.1.3 相交射流.....	(67)
3.1.4 射流错流.....	(68)
3.2 燃烧化学反应动力学基础.....	(71)
3.2.1 质量作用定律.....	(71)
3.2.2 影响反应速率的因素.....	(72)
3.2.3 基元反应与总包反应.....	(74)
3.3 着火过程.....	(75)
3.3.1 燃烧室中的着火条件.....	(76)
3.3.2 热自燃的浓度界限与区间.....	(78)
3.3.3 强迫点燃理论.....	(79)
3.4 火焰结构.....	(80)
3.4.1 层流火焰传播理论.....	(80)
3.4.2 紊流火焰传播理论.....	(83)
3.4.3 层流预混火焰的结构.....	(86)
3.4.4 紊流预混火焰的结构.....	(87)
3.4.5 层流扩散火焰的结构.....	(88)
3.4.6 紊流扩散火焰的结构.....	(89)
3.4.7 火焰高度.....	(89)
3.5 油粒与炭粒的燃烧.....	(89)
3.5.1 油粒的燃烧.....	(90)
3.5.2 油雾燃烧火焰.....	(92)
3.5.3 炭的反应速度.....	(92)
3.5.4 炭燃烧的动力区和扩散区.....	(93)
3.5.5 内部反应.....	(94)
3.5.6 二次反应的影响.....	(95)
3.5.7 炭粒的燃烧.....	(96)
3.5.8 煤粉燃烧火焰.....	(97)
作业题.....	(98)
4 燃料的燃烧方法与装置	(99)
4.1 气体燃料燃烧的方法与装置.....	(99)
4.1.1 有焰燃烧.....	(100)
4.1.2 半无焰燃烧.....	(101)
4.1.3 无焰燃烧.....	(101)
4.1.4 平焰燃烧.....	(102)
4.2 液体燃料燃烧的方法与装置.....	(103)
4.3 固体燃料的燃烧方法.....	(108)

4.3.1	固体燃料的层状燃烧	(108)
4.3.2	悬浮燃烧法	(110)
4.3.3	旋风燃烧法	(112)
4.3.4	沸腾燃烧法	(114)
	作业题	(116)
5	燃烧过程数值模拟	(117)
5.1	计算燃烧动力学的应用	(117)
5.2	燃烧过程数值模拟的分类	(118)
5.3	燃烧过程数值模拟方法	(119)
5.3.1	基本守恒方程组和物理模型	(119)
5.3.2	求解域和守恒方程的离散化	(125)
5.3.3	离散方程的求解方法	(125)
5.4	燃烧过程数值模拟软件	(126)
5.4.1	OpenFOAM	(126)
5.4.2	KIVA	(128)
5.5	燃烧过程数值模拟的应用	(129)
5.6	数值模拟的流程步骤	(130)
	作业题	(138)
6	燃烧主要有害物的生成机理与控制方法	(139)
6.1	燃烧主要有害物的生成机理	(139)
6.1.1	CO的产生机理	(139)
6.1.2	炭黑的生成机理	(139)
6.1.3	硫氧化物的生成机理	(140)
6.1.4	氮氧化物的生成机理	(140)
6.1.5	烟尘的生成机理	(141)
6.2	燃烧有害物的控制	(142)
6.2.1	CO的控制	(142)
6.2.2	炭黑的控制	(143)
6.2.3	硫氧化物的控制	(143)
6.2.4	氮氧化物的控制	(144)
6.2.5	烟尘的控制	(144)
6.3	煤炭燃烧的大气污染	(145)
6.3.1	煤炭燃烧造成大气污染的原因	(145)
6.3.2	煤炭燃烧的大气污染相关治理策略	(146)
6.4	国外发达国家的防治对策	(146)
6.4.1	美国大气污染防治对策	(146)
6.4.2	欧盟大气污染防治对策	(147)
6.5	国外大气污染防治技术应用状况	(148)

6.5.1 美国大气污染源最佳可行控制技术(BACT)	(148)
6.5.2 欧盟大气污染源最佳可行技术(BAT)	(149)
作业题	(149)
附表1 气体平均比热容	(150)
附表2 可燃气体的主要热工特性	(151)
参考文献	(152)

绪 论

燃烧是目前人类获取能量最主要的手段。通过燃烧矿物燃料所获取的能量占世界总能量消耗的90%以上,因此燃烧过程组织得合理与否在很大程度上影响到能源是否得到合理利用和能耗是否得到降低。鉴于我国的现实情况,各种热力设备中燃烧效率与能源利用程度普遍较低,燃料消耗量较大,因而迫切需要加强燃烧的理论研究与提高组织燃烧的技术水平。

燃烧学是一门研究燃烧现象、实践和理论的科学。燃烧涉及化学、热力学、传热传质学和流体力学等诸多方面的内容,是一个复杂的过程。燃烧学是一门正在发展中的学科。能源、航空航天、环境工程和火灾防治等方面都提出了许多有待解决的重大问题,诸如高强度燃烧、低品位燃料燃烧、煤浆(油-煤,水-煤,油-水-煤等)燃烧、流化床燃烧、催化燃烧,渗流燃烧、燃烧污染物排放和控制及火灾起因和防治等。燃烧学的进一步发展将与紊流理论、多相流体力学、辐射传热学和复杂反应的化学动力学等学科的发展相互渗透、相互促进。

(1) 燃烧学发展简史

在古希腊神话中,火是普罗米修斯(Prometheus)为了拯救人类,从天上偷来送到人间的,它是神的赐予。在我国的神话中,火是燧人氏钻木取得,是人类的创造。但这些终究还是神话与传说,没能揭开火的本质。

由于燃烧的复杂性,人类对火的认识长期处于无知状态,把物质能否燃烧归之于物质中是否含有一种“燃素”。直到18世纪中叶, Lavoisier 和 Laplace 根据所作的实验提出了物质氧化的概念,这才真正揭开了火的谜团。19世纪中叶, Hess, Kirchoff 发展了热化学和化学热力学,把燃烧根据反映动力学体系来研究,阐明了燃烧学、燃烧产物和燃烧温度的有关规律,形成了燃烧静力学。此后,工业革命推动了化学科学的发展,随着原子、分子学说的建立,热化学、热力学、化学热力学和化学动力学得到较大发展,将燃烧推向了新的阶段。20世纪初~30年代,美国化学家刘易斯(B. Lewis)和苏联化学家谢苗诺夫(B. H. Semenov)等人研究了燃烧的反应动力学机理,认为燃烧的化学反应动力学是影响燃烧速率的重要因素,并发现燃烧反应具有链锁反应的特点,并根据化学动力学和传热传质学的观点,建立了着火及火焰传播理论。50年代后期~60年代,美国力学家冯·卡门(Von Karman)和我国力学家钱学森首次倡议用连续介质力学方法来研究燃烧现象,并逐渐发展成“反应流体力学”。许多学者根据这一方法对一系列燃烧问题,如层流燃烧、湍流燃烧、火焰稳定等进行了广泛的研究。到了70年代,随着大型电子计算机的出现,英国科学家斯波尔丁(D. B. Spalding)等人比较系统地把计算流体力学的方法

用于燃烧研究，建立了“计算燃烧学”。通过计算燃烧学能够解决边界层流动、回流流动以及漩流流动等燃烧问题的数值计算，计算燃烧学能够定量预测燃烧过程和燃烧设备性能，使燃烧理论及其应用达到了一个新的高度。目前计算燃烧学已应用于气体燃料燃烧、液雾燃烧、煤粉燃烧的研究，并取得了进展。燃烧测试方面逐渐采用先进的测试技术(如激光技术)，改进了燃烧实验方法和提高了测试精度，使人们能更深入地、全面地、精确地研究和掌握各种燃烧现象的机理，使燃烧学在深度和广度等方面有了飞跃的进展。与此同时，激光技术与各种气体分析技术的发展，使人们有可能直接测量燃烧条件下的气体速度、温度、组分浓度及燃料颗粒速度、浓度和尺寸分布，从而对燃烧机理的研究发展到更高阶段。

由上可见，燃烧是一门古老而年轻的学科，人类在几千年甚至几万年以前就已经在应用了。对燃烧本质和燃烧规律的认识，是在最近一、二百年特别是最近几十年才有了较大的发展。目前燃烧的应用已经遍及动力、冶金、石油、化工、交通运输、机械制造、纺织、造纸、食品、国防以及人民生活的各个领域。

(2) 燃烧学的应用

燃烧学是由热力学、化学动力学、流体力学、热质交换以及一定程度的数学有机组成的一门内容丰富而且实用性很强的学科。燃烧科学的研究主要从两方面进行，一方面是燃烧理论的研究，主要研究燃烧过程所涉及的各种基本现象；另一方面是燃烧技术的研究，主要是应用燃烧理论解决工程中各种实际燃烧问题，通过燃烧基本理论和实验研究，以及对燃烧技术的分析与改进以促进对新的燃烧技术的探索与研究等，务求合理地、有效地组织和控制燃烧过程，选用最适宜的燃烧方法与燃烧装置。以提高燃烧效率，节约能源。燃料燃烧时，除了发出光与热外还会散发出大量的烟尘、灰分、有害与无害的气体以及臭味与噪声，有时还有未经燃烧的部分燃料随着烟气被排放出来。燃烧排放物会污染环境，会妨害人们的健康和动植物的生长，为此，应积极开展对燃烧污染物形成机理的研究，探索通过改变燃烧工艺、精心控制燃烧过程以减少或消除污染物排放的有效方法。

(3) 燃烧与国民经济和能源的关系

燃烧在工程中应用十分广泛，在动力生产方面：人类所需的动力生产几乎都牵涉到固体、液体或气体燃料的燃烧。它涉及的领域很广，从火箭、航空发动机到民用锅炉、燃气轮机、冶金炉、工业炉、内燃机、防火及大气污染等，都存在大量的燃烧问题。

以上是从燃料燃烧在工程中的地位这一角度说明研究燃烧的重要性。下面再从能量消耗的角度来说明研究燃烧学的重要性。

我国是一个能源资源比较丰富的国家，截至 2018 年底，煤的探明量达 16666.73 亿吨，居世界第三位；石油的储量 1015 亿桶，居世界第七位；天然气的储量 5.5 万亿立方米。下表列出了我国 1983 年/2000 年/2018 年能源消费结构情况。

我国 1983 年/2000 年/2018 年能源消费结构情况

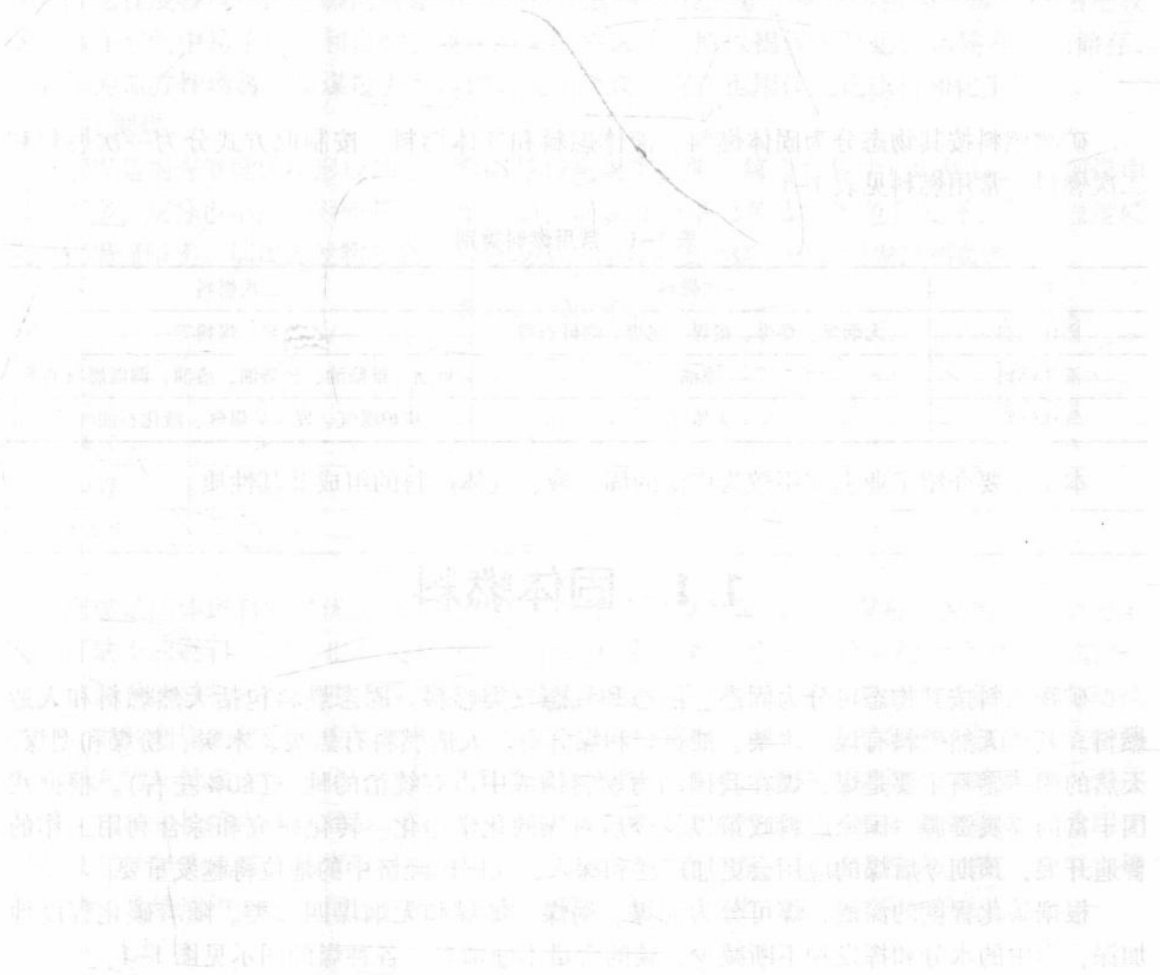
年份	煤	石油	天然气	水电	核电和新能源
1983	71.6	21.3	2.3	4.8	—
2000	71.0	20.3	2.8		5.9
2018	59.0	18.7	7.8	8.2	6.3

从上表看出：

(1)我国能源消费结构中，矿物燃料比重占绝大部分，但与美国、苏联相比，能源消耗结构比重占第一位的是煤，石油占第二位。

(2)我国能源消费结构变化趋势为天然气、水电、核电及新能源比重略有增加，煤和石油比重略有下降。

综上所述，燃烧学应用广泛且理论体系复杂，认真学习应用燃烧学理论并不断将之应用于工程实践，对节约能源降低环境污染有着非常重要的意义。



1 燃料

矿物燃料按其物态分为固体燃料、液体燃料和气体燃料。按制取方式分为一次燃料和二次燃料。常用燃料见表 1-1。

表 1-1 常用燃料类别

类别	一次燃料	二次燃料
固体燃料	无烟煤、烟煤、褐煤、泥煤、煤矸石等	焦炭、煤粉等
液体燃料	原油	重油、重柴油、轻柴油、渣油、调混燃料油等
气体燃料	天然气	焦炉煤气、发生炉煤气、液化石油气等

本章主要介绍工业上应用较为广泛的固、液、气体燃料的组成及其性质。

1.1 固体燃料

矿物燃料按其物态可分为固态、液态和气态三类燃料。固态燃料包括天然燃料和人造燃料。其中天然燃料有煤、木柴、油页岩和煤矸石。人造燃料有焦炭、木炭、粉煤和型煤。天然的固体燃料主要是煤，煤在我国动力燃料构成中占有统治的地位(80%左右)。根据我国丰富的煤炭资源、国家燃料政策以及今后对煤的化学净化、转化研究和综合利用工作的普遍开展，预期今后煤的应用会更加广泛和深入，在国民经济中的地位将越发重要。

根据碳化程度的深浅，煤可分为泥煤、褐煤、烟煤和无烟煤四大类。随着碳化程度地加深，煤中的水分和挥发物不断减少，碳的含量不断增多。各种煤的图示见图 1-1。

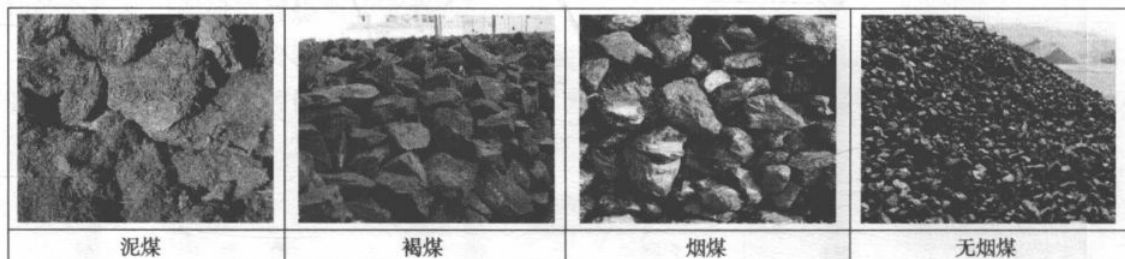


图 1-1 各种煤的图示

(1) 泥煤

泥煤是最年轻的煤，碳化程度最浅，水分含量最高，其中还残留了部分植物的残体。

因此，其发热量很低。又因为不便于运输，工业上使用价值不大，一般仅用作产地附近的民用燃料。

(2) 褐煤

褐煤是泥煤经过进一步碳化而形成的，其中已不再有木质素、纤维素和植物的残体。它的外观多呈褐色，少数呈褐黑色或黑色，故名褐煤。与泥煤相比，它较坚实，且含碳量较高，挥发物则相对的较少。据中国煤的分类草案规定：褐煤的可燃基挥发物大于 37%，一般均在 46%~55%，有些可达 60%。挥发物析出的温度较低，因而容易着火、燃烧。褐煤因碳化程度较浅，固定碳的含量不多，且含有较多的灰分、水分等杂质，故其发热量较低。因在空气中易于风化和自燃，风化后又极易破碎，所以褐煤不易长途运输和长期储存，只能作为地方性燃料。褐煤过去大多作为民用燃料，现在也用作气化原料和化工原料。

(3) 烟煤

烟煤是褐煤继续碳化形成的，其含碳量较褐煤多，氢、氧含量较少(见表 1-2)。烟煤中水分不多，灰分也不高，因而其发热量较高，烟煤外观呈黑色或暗黑色且发亮，机械强度较大，较褐煤坚实。烟煤挥发物较高，水分较少，容易着火燃烧，燃烧时发出褐黄色火焰。

表 1-2 煤的元素组成

%(质量)

项目	C	H	O	N	S
泥煤	60~70	5~6	25~35	1~3	0.3~0.6
褐煤	70~80	5~6	15~25	1.3~1.5	0.2~3.5
烟煤	80~90	4~5	5~15	1.2~1.7	0.4~3
无烟煤	90~98	1~3	1~3	0.2~1.3	0.4

烟煤是固体燃料中最优质的燃料，故它是工业用煤中最重要的煤种，是冶金和动力工业不可缺少的燃料，同时也是近代化学工业的重要原料。这种煤最大的特点具有焦结性，这是其他固体燃料所没有的，因此它又是炼焦的主要原料。但因烟煤的挥发物产量变动范围大，各种烟煤的焦结性也不尽相同，所以其用途也就不一样。根据各种烟煤的焦结性强弱和挥发物产量多少等理化性质可把烟煤分为贫煤、瘦煤、焦煤、肥煤、半炼焦煤、弱还原煤、气煤和长焰煤 8 个品种。其中长焰煤和气煤挥发物产量高，易于着火燃烧，适用于制造煤气；半炼焦煤、焦煤以及肥煤等，由于其挥发物产量少，焦结性强，故主要用来炼焦。肥煤是最理想的炼焦用煤，但储藏量不多，因之很宝贵，故一般不用作动力燃料。

(4) 无烟煤

无烟煤是碳化程度最深的一种煤，其含碳量可高达 90% 以上，而挥发物只有 0~10%，含水分也少，约 1%。因含氢量少，故发热量较烟煤低。

无烟煤通称白煤，浅黑色而有光泽，结构紧密，均匀而坚硬，密度大，几乎全是由固定碳组成。

无烟煤由于挥发物少，着火困难，但耐烧。燃烧时，火焰短呈浅蓝色，且无烟。无烟煤机械强度高，吸水性小，不易风化和自燃，适于长途运输，但受热后容易爆裂成碎片。

无烟煤不结焦，焦炭呈粉状，灰分少，灰熔点较低。无烟煤大多用作动力燃料。若将无烟煤进行热处理，提高其抗爆性，成为耐热无烟煤，可用于气化或在小高炉和化铁炉中代替焦炭使用。

在无烟煤和烟煤之间还有一种半无烟煤。色灰黑，微发亮，质较无烟煤软，挥发物与

无烟煤相近，因其中氢含量稍多，故其挥发物发热量较无烟煤略高。

煤不仅是重要能源，又是很重要的化工原料，如何合理利用煤炭资源是十分重要的问题。我国煤炭资源非常丰富，而且煤种比较齐全，可适应各种工业需要，应当大力开展综合利用，充分发挥其效益。

(5) 煤矸石

煤矸石不应该算作煤，它只是一种煤的伴生物，是夹在煤层中，含有可燃物质的岩石。煤矸石是一种沉积岩，是在煤层形成的时候就同期形成的，大多数是石灰岩，由于长期受煤层浸润扩散所致，颜色呈黑灰色。以前由于没有技术利用燃烧煤矸石，都被当作废物扔掉，既污染了环境，又浪费了资源。近年来，由于燃烧技术的进步，也被用作锅炉燃料。不过一般锅炉无法直接燃烧此类燃料，只能和其他固体燃料掺烧，或在沸腾炉中使用。煤矸石灰分含量很高，发热量较低。所以煤矸石单独燃烧很困难，可以制成粉末状配合好煤在煤粉炉中燃烧利用，也可以在特殊设计的沸腾炉中当作燃料。粉煤灰可以当作建材原料。

(6) 油页岩

油页岩是一种片状的含油岩石。根据沉积环境，油页岩成因类型可以分成陆相、湖相和海相三种基本成因类型。油页岩(又称油母页岩)是一种高灰分的含可燃有机质的沉积岩。它和煤的主要区别是灰分超过40%，与碳质页岩的主要区别是含油率大于3.5%。油页岩属于非常规油气资源，以资源丰富和开发利用的可行性而被列为21世纪非常重要的接替能源。它与石油、天然气和煤一样都是不可再生的化石能源。

油页岩是在内陆湖海或滨海潟湖深水还原条件下，由低等植物和矿物质形成的一种腐泥物质，是高灰分的腐泥煤。凡腐泥煤灰分为50%~70%者称为油页岩，含有类似天然石油的页岩油。油页岩原始有机物质主要来源于水藻等低等浮游生物，其中以蓝藻、绿藻和黄藻最为重要。油页岩外观多呈褐色泥岩状，其相对密度为1.4~2.7。油页岩中的矿物质常与有机质均匀细密地混合，难以用一般选煤的方法进行选矿。含有大量黏土矿物的油页岩，往往形成明显的片理。

油页岩的开发利用可以追溯到17世纪。到19世纪时，油页岩的年产规模达百万吨，已经可以从油页岩中生产一些诸如煤油、灯油、石蜡、燃料油、润滑油、油脂、石脑油、照明气和化学肥料等产品。到20世纪早期，由于汽车、卡车的出现，油页岩作为运输燃料被大量地开采。直到1966年，由于原油的大量开采利用，油页岩作为主要矿物能源才退出历史舞台。现在油页岩的利用更加广泛，爱沙尼亚、巴西、中国、以色列、澳大利亚、德国等国对油页岩利用已经扩展到发电、取暖、提炼页岩油、制造水泥、生产化学药品、合成建筑材料以及研制土壤增肥剂等各个方面。

世界油页岩资源主要分布于美国、俄罗斯、中国、爱沙尼亚等国。据EIA统计，全球33个国家页岩油可达4100亿吨。

世界上已发现的非常规油气资源大多位于地缘政治相对稳定的西半球，即美国、加拿大和拉丁美洲。美国是全球油页岩资源最丰富的国家，储量约占全球储量的70%以上。加拿大是全球沥青砂资源最丰富的国家，储量约占全球储量的90%以上。全球油页岩资源十分丰富，据不完全统计，其蕴藏资源量约有10万亿吨，比煤炭资源量多40%。

1.1.1 煤的工业分析

煤的工业分析，包括水分(W)、灰分(A)、挥发分(V)和固定碳(F)含量测定四项，其

中水分、灰分和挥发分可以经过测试测量出来，固定碳则是煤炭在一定特殊的条件下才能转化出来，需要使用差减法计算。煤的工业分析是了解煤质基本特征的主要指标，并由此来确定各煤种的工业用途及其加工利用效果。我国采取较为详细全面的标准来规范工业分析测试，以得到更完善、更精确的测试结果，而煤的工业分析过程及结果的准确性也能很好的衡量专业工作人员的工作水平。

1.1.1.1 水分的测定及测定意义

在煤炭的交易供给中，水分是衡量整个煤炭质量和重量的重要标准之一，直接影响到煤的使用、储存和运输，是煤的工业分析中重要的组成部分之一。各种固体燃料在被送交成分检测和交付使用时都含有一定量的水分，水分是燃料的重要组成部分，是这些固体燃料客观存在的事实。在煤质的分析中，不同煤质的水分分析结果可以为其提供最基础的数据，在煤炭的贸易活动中，水分是一个重要的计算质量的指标。水分不论是在煤的加工利用还是在基础理论研究中都起到很大的作用，具有重要的意义。

根据一定的采集样本标准和要求，从商品煤及用户煤场等处采集回来的煤样本被称为应用煤样，对应用煤样在实验室进行研究分析，叫作收到煤样。煤样中含有的水分所占煤样质量的百分比被称为煤的总水分。固体燃料里的水分按其存在形态分为两类，即游离水和化合水。游离水是以物理状态吸附在燃料颗粒内部毛细管中和附着在燃料颗粒表面的水分，煤的颗粒越小，内部孔隙越多，那么煤中所含的水量也就越多。化合水也叫结晶水，是以化合的方式同燃料中物质结合的水。

游离水又可以分成两种，一种是容易挥发的水分，通常存在于煤炭表面或者是发育很好的细小孔隙中，被称为外在水分。使应用煤样在空气中放置，过一段时间之后水分在空气中不断流失蒸发，当空气中的水蒸气和煤中的蒸汽压平衡时，这个时候所流失蒸发的水分所占煤样质量的百分比就是煤的外在水分。而没有失去仍有残留的便是常温中不太容易挥发的水分——内在水分，也叫风干煤样水分，这部分水分主要存在一些发育不全的煤体孔隙中。内在水分在 $105\sim 110^{\circ}\text{C}$ 的温度下经过若干时间加热可蒸发掉。内在水分的质量和外在水分的质量相加便是煤的总水分，它是指刚开采出来或者是马上要投入生产使用的煤中的所有水分。而结晶水通常要在 200°C 以上才能解析出。燃料工业分析测定的水分只是游离水，不测结晶水。一般来说，煤的内在水分、外在水分、全水分等指标都是以百分比的形式表现在煤的工业分析中。

水分在燃料燃烧时蒸发吸热，消耗燃料燃烧产生的热能。燃料中的水分还能还能增多会减少燃料的有效成分，降低燃料的发热量，提高燃料的燃点，不易着火，影响焙烧前期的升温速度，是燃料中的有害成分。

1.1.1.2 灰分的测定及测定意义

固体燃料的灰分是指煤炭类矿物质燃料在 $(815\pm 10)^{\circ}\text{C}$ 条件下，生物质燃料在 $(550\pm 10)^{\circ}\text{C}$ 条件下完全氧化燃烧后的残留物。燃料中的灰分来源于燃料中的无机物、矿物质，如黏土矿物、石膏、碳酸盐、黄铁矿等矿物质。这些物质在燃料的燃烧中发生分解和化合，有一部分变成气体逸出，剩下的残渣以氧化物、硫酸盐、磷酸盐、硅酸盐等形式存在。这些残渣所占煤样总质量的百分比就被称为煤的灰分产率。燃料的灰分越高，含碳量就越低，不仅降低了燃料的发热量，而且，当无机物、矿物质在燃料燃烧后成为灰分时还要吸收热量，排渣时也要带走热量。灰分是燃料的有害成分，但有的燃料中无机物、矿物质可以成

为做砖的原料，比如有的煤炭、煤矸石中含有高岭石、伊利石等黏土矿物，即便这种燃料灰分较高，也可直接作为内燃料烧制砖，既作燃料又是原料。

煤中所含的水分会受到空气中的湿度影响，水分的多少会根据湿度的变化而产生改变。而对于有些相对干燥的煤样来说，灰分的产率不会出现太多的变化。因此在进行测定灰分时，一般选用粒度小于0.2mm相对干燥的煤样，这时检测的结果称为干燥基的灰分产率。在实际的测定过程中，空气干燥基的灰分产率只能取中间数值，并且不是固定数值，通常要换算成干燥基的灰分产率。

煤中灰分的测定是研究煤质特性和利用的重要指标。在炼铁的工业中，以煤炭中灰分的测定指标来确定焦炭的质量。煤的灰分越高，有效碳的产率就越低，煤中灰分的含量已经作为商业上定级的依据。并且灰分和发热量、含碳量、活性等方面都有互相依赖的关系，通过灰分的测定研究可以测评出煤炭的相关特性。

1.1.1.3 挥发分和固定碳的测定及测定意义

煤中无机物的组成特点由水分和灰分来进行反映，有机物的组成特点则由挥发分和固定碳来反映。挥发分能够反映出煤样中的很多性质，几乎所有的煤样研究和煤样利用中都会需要采取煤的挥发分相关数据，挥发分也是煤的最重要的数据之一。

固体燃料的挥发分，是燃料中的有机质在150~900℃温度下隔绝空气加热，在受热过程中有机质陆续分解而产生的多种气体挥发物。这些挥发物不是燃料固有的，而是燃料在特定温度下热解产生的气体，含有氮气、氢气、甲烷、一氧化碳、二氧化碳、硫化氢、结晶水以及其他复杂的有机可燃性化合物组成的混合气体，其中大部分是可燃气体，是燃料全部完全燃烧总发热量的一部分。分解的化合物被称为挥发物，挥发物所占煤样质量的百分比称为挥发分或者是挥发分产率。而加热后以固态形式残存下来的有机质所占煤样质量的百分比便称为固定碳。固定碳并不能单独存在于煤样本身，煤中的灰分是燃烧后残存的渣滓，固定碳与灰分一起组成了焦渣，焦渣中去除灰分便是固定碳。

挥发物的热值视其成分不同悬殊，低的约为 $2000 \times 4.2 \text{ kJ/kg}$ ，含氢气多的挥发分热值可高达 $12000 \times 4.2 \text{ kJ/kg}$ 。这些可燃性气体挥发物的燃点很低，挥发分在燃料里含量的多少很大程度上决定了该燃料的着火点（即燃点）的高低，也影响燃料的发热量。挥发分越多越易点燃，燃点就越低；挥发分越少越难点燃，燃点就越高。但是如果燃烧条件不适当则会造成挥发分热解速度快但燃烧慢，甚至未燃烧，这时易产生并排放未燃尽的气体挥发物质，俗称“黑烟”，并产生一氧化碳、多环芳烃类、醛类等污染物，降低燃料的燃烧热效率。

煤样煤化程度在不断提高的同时，挥发分会不停地下降。例如褐煤的挥发分都比较高，一般在70%以上；无烟煤的挥发分则较低，一般在10%以下。在煤样自身的有机物质高分子缩聚时，小分子的化合物同时运动，便会产生氢气，也就使煤产生了挥发分。随着煤样煤化程度的提高，煤矿分子里的含氧官能团和脂肪侧链都呈现下降趋势，所以煤的挥发分会随着煤样煤化程度的提高而下降。

煤化程度会对煤的挥发分造成一定影响，同时煤岩的类型或是成因类型也会对挥发分起到一定程度的影响。腐植煤的挥发分与腐泥煤相比明显较低，主要是因为两种煤岩的原始结构不同，腐植煤主要是以稠环芳香族物质为组成部分，在受热之后不容易溶解，而腐泥煤主要以脂肪族为主，容易受热分解为小分子化合物。

根据煤的挥发分和固定碳的工业分析，可以得出挥发分产率并且测定挥发分后的焦炭特性，对于确定煤的加工途径具有决定意义。高挥发分的煤，在干馏时化学副产品的产率