

清华大学学术专著

煤燃烧理论 及其宏观通用规律

傅维镛 著



清华大学出版社

清华大学学术专著

煤燃烧理论 及其宏观通用规律

傅维镛 著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书系统地介绍了作者采用与前人不同的研究方法,对煤的热解、着火、燃烧、气化及其反应动力学的理论进行的研究,其重点在于揭示煤燃烧理论中的宏观通用规律,使广大科技工作者能对这种较简便、统一的煤燃烧的基本规律有一定的了解,从而促进煤燃烧科学与技术的发展。本书中所提出的有关宏观通用规律经过多种典型煤种乃至几十种国内外煤种的检验,被证明是合理的,并已在国际著名燃烧刊物上公开发表。然而,由于煤燃烧现象的复杂性,尚有一些重要问题的通用规律,有待进一步研究。

本书可供广大煤燃烧研究人员、锅炉设计及运行人员参考。也可供有关专业的本科生及研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

煤燃烧理论及其宏观通用规律/傅维镛著. —北京:清华大学出版社,2003

(清华大学学术专著)

ISBN 7-302-06983-2

I. 煤… II. 傅… III. 煤—燃烧原理 IV. TQ534

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 070087 号

出 版 者: 清华大学出版社

[http:// www. tup. com. cn](http://www.tup.com.cn)

社 总 机: 010-62770175

地 址: 北京清华大学学研大厦

邮 编: 100084

客户服务: 010-62776969

责任编辑: 金文织

印 刷 者: 清华大学印刷厂

装 订 者: 三河市印务有限公司

发 行 者: 新华书店总店北京发行所

开 本: 153×235 印张: 17.75 插页: 1 字数: 297 千字

版 次: 2003 年 11 月第 1 版 2003 年 11 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-302-06983-2/TK·30

印 数: 1~2000

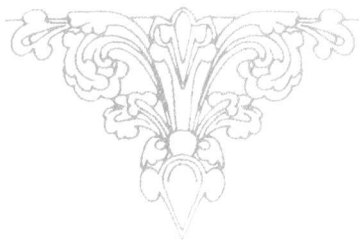
定 价: 38.00 元



作者简介



傅维镛，1959年毕业于清华大学动力机械系，并留校任教至今。现为教授、工程热物理学科博士生导师，曾长期任工程热物理教研室主任。现任国际燃烧会议论文评委，《燃烧科学与技术》刊物副主编，《工程热物理学报》编委。长期从事燃烧科学与技术方面的教学与科学研究工作。近十几年来主要从事煤燃烧科学与技术的研究及重质油、水基燃料油的研究，发表论文约100篇，其中《煤燃烧特性的宏观通用规律研究》获国家自然科学基金四等奖；《通用煤粉主燃烧器》获国家发明二、四等奖和中国专利创造发明金奖与优秀奖，与哈尔滨锅炉厂合作，发展为大容量切圆燃烧挥发分煤粉锅炉，哈尔滨锅炉厂已获《国家重点新产品证书》，经济及社会效益巨大。还获国家教育部、原电力工业部一、二等奖多项，著有《燃烧学》教科书。



Abstract

The present author schematically introduce the method different from previous ones to study the theories of coal pyrolysis, ignition, combustion, gasification and reaction kinetics in this book. The emphasis of it is that we try to reveal the macro-general rules of coal combustion theories and to provide the simpler, unified coal combustion theories for science and technology workers. The macro-general rules presented by this book have been verified by some typical coal types, even by several decates coal types of both China and abroad and published in the international famous journals. However, because of complexity of coal combustion, the general results for some important problems need to be studied in the future.

This book has been written for those readers who are studying in coal combustion and for designers or operators of pulverized coal-fired furnaces. It is also useful for related undergraduate and graduate students.

前 言

煤是由许多种类不同的化学官能团、无机物及水分组成的复杂可燃物。在高温氧化环境中,它的物理及化学变化极其复杂。由于煤对人类生活及生产的重要性,人们一直在对它的燃烧过程进行研究,且经历了几十年的研究之后,已经取得了十分丰富而有用的成果。但是有一个十分重要的问题一直未得到解决,这就是这些成果的通用性问题。许多研究者感到煤燃烧现象太复杂,难以找到它们的通用规律,所以在这方面一直未取得突破性的进展。

人们对煤热解的研究已有几十年的历史,建立了许多热解模型。它们的共同结论是,其总体热解动力学参数 E 及其频率因子 k_0 与煤种有关,但却一直找不到它们之间的通用关系。同样,煤表面反应的等效动力学参数值也与煤种有关,也一直找不到它们之间的通用关系。虽然从文献中可以找到大量的 $E(k_0)$ 的数据,但用户很难选用。煤焦气化反应动力学参数与煤种之间的关系也存在同样的问题。许多数值模拟研究者只能从文献中无把握地选用这些数据计算,其科学性令人怀疑。

对于煤焦着火规律的研究经历了几十年的历史,研究者们也已认识到煤焦的着火温度、着火时间与煤种有密切的关系,但难以给出它们之间的通用关系。

人们对煤焦燃烧速率的研究由来已久,并已发表了大量的文章,但至今除数值模拟外还给出一个通用的表达式来预报扩散控制、动力控制及扩散-动力控制条件下的煤焦燃烧速率。

对于煤的燃烧技术,则认为更是无通用可言,人们已习惯于对不同煤种进行不同的燃烧器结构设计,以适应不同煤种的要求。这种状况给煤粉锅炉的正常运行带来许多困难,因为中国的煤质多变。

由以上的分析可知,如果对煤燃烧理论的研究仍停留于目前这种状况,将使设计者、数值模拟者得不到可靠而通用的实验数据及子模型,从而将严重影响煤燃烧科学与技术的发展。为此,作者在多年煤燃烧研究的经验积

累的基础上,大胆地提出了关于“煤燃烧特性的宏观通用规律研究”的学术探索方向,这是一个目前国际上尚未解决的难题。由于其学术意义及应用价值重大,得到了国家攀登计划的资助,被列为《煤和石油的高效低污染燃烧基础研究》的一个子课题。本书中将以新的观点和方法研究煤的燃烧理论,其重点是力图使有关煤燃烧理论在更大的范围内适用,即本书中所称通用规律。

本书与一般的煤燃烧理论书有所不同,其特点,一是充分利用了煤燃烧现象中的宏观特性,抓住其关键之处,在进行认真分析的基础上,提出了能供工程应用的计算方法,这是解决复杂现象的一种方法。它避免了罗列众多的、繁杂的实验现象及实验数据,突出了本质。其二是注意问题的深入浅出,尽量使最后的结果转化为工程技术人员易掌握、易操作的理论,避免了把本来就已很复杂的煤燃烧理论搞得更复杂,使广大工程技术人员敬而远之。本书中很少涉及煤燃烧过程的微观分析,这是另一条研究路线。尽管目前这条路线要取得能供工程应用的研究成果尚有困难,但它对认识燃烧过程的物理本质十分有用,值得进行探索。

诚然,煤燃烧现象是极其复杂的,要找到它们的通用规律绝非易事(这里所指的通用规律仅限于常用的动力用煤,即烟煤、贫煤、无烟煤、褐煤、劣质烟煤等煤的燃烧规律的通用性问题)。正因为这样,在研究方法上只能抓住事物的本质及其主要影响因素,探求其宏观规律,而不宜拘泥于某些细节及次要因素。作者深信,任何复杂现象都有其内在联系与规律,而且总有一、二个基本规律起着主导作用。我们只要努力探索,必然有所发现,有所前进。本书所介绍的内容就是这种尝试,其中提出了一套与前人不同的研究煤燃烧理论的新思想和新方法,目的在于揭示煤燃烧的规律及其通用性。努力使煤燃烧研究逐步由定性发展到定量,由经验或半经验理论发展到通用理论。本书中所进行的这一尝试是初步的,还有许多问题值得深入研究,煤燃烧理论的通用性问题尚未得到完全解决。作者衷心地希望对通用规律有兴趣的同行们对本书提出的宏观通用规律进行验证,并提出自己的学术见解。一种新的理论只有通过具体的讨论,给予肯定或否定、补充、修正,才会进一步完善与发展。尽管本书在探索煤燃烧理论的通用性方面迈出的这一步仅仅是开始,然而这是重要的一步。

本书中所涉及的研究工作得到了国家科技部及国家自然科学基金委员会的资助,在此深表感谢。

本书可供我国煤燃烧科学与技术的研究人员参考,也可供高等学校的

本科生及研究生参考。

本研究工作主要由我和我的研究生们及我的同事共同合作完成,对他们的创造性的辛勤劳动深表感谢。

本书在出版过程中得到了中科院院士、中科院力学研究所吴承康教授,工程院院士、浙江大学岑可法教授及清华大学郑洽餘教授的支持,在此表示感谢。

傅维镛

主要符号表

拉丁字母

A	灰分的质量分数;面积(m^2)
B	燃烧完全度;质量传输数
C	碳的质量分数
c_p	比热容(J/kg)
$c_{p,c}, c_{p,c,0}$	碳(炭)的比热容(J/kg)
D	扩散系数(m^2/s)
Da_g	空间反应邓克尔数
Da_s	表面反应邓克尔数
d_p	颗粒直径(mm)
$\overline{d_p}$	无因次直径
E	活化能(kJ/mol)
F_z	煤质指数;着火特性指数
Fb	燃烧状态指数
G_c	碳(炭)粒燃烧速率(kg/s)
$\overline{G_c}$	无因次碳(炭)粒燃烧速率
g_c	碳(炭)粒比燃烧速率($\text{kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$)
g_o	氧的比流率($\text{kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$)
g	重力加速度(m/s^2)
h	传热系数($\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$);对流换热系数
K	等效反应速率系数(m/s)或($\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{kPa}$)
K_0	加热速率(K/s)
k	化学反应速率系数(m/s)或($\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{kPa})$)
k_0	化学反应频率因子(m/s)或($\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{kPa})$)
L	潜热(J/kg)
$\overline{M}, M$	相对分子质量;内在水分含量;质量;平均分子质量
m	质量
p	压力(Pa)
q	热值(J/kg)

Q	反应热(J/kg)
R	通用气体常数(J/(mol · K)); 半径(m)
R_i	内表面反应速率(kg/(m ² · s))
S	表面积(m ²);
s	比表面积(m ² /kg)
t	时间(s)
T	温度(K)
u	轴向速度(m/s)
v	径向速度(m/s)
V	挥发分质量分数
$w, \bar{W}$	化学反应速率(kg/(s · m ³)); 无因次化学反应速率
Y	质量分数
$\bar{Y}$	无因次质量分数
Z	无因次坐标

希腊字母

δ	分子量比
α	过量空气系数; 热扩散率(m ² /s); 挥发分在两个反应中所占质量分数
β	消耗单位质量燃料所需氧的质量
ν	化学当量系数
ϵ	无穷小数; 黑度系数
σ	斯蒂芬-玻耳兹曼常数($=5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$)
η	无量纲坐标, 动力粘度(Pa · s)
ξ	无量纲坐标
λ	导热系数(W/(m · K))
ρ	密度(kg/m ³)
τ	反应时间(s)
θ	无因次温度
ψ	流函数
φ	角度; 无因次坐标

下角标

a	灰
as	灰壳

b	燃尽
c	碳
ch	炭
d	扩散
e	等效
F	燃料或 CO
f	火焰; 最终的
g	气相
i	着火;
<i>i</i>	第 <i>i</i> 种组分
<i>L</i>	损失
o	氧化剂
p	产物; 颗粒
r	辐射, 任一反应时刻
s	表面
T	热
t	任意时刻
v	挥发; 蒸发
w	壁
*	临界状态; 固体
0	初始
ad	分析基
daf	可燃基
ar	应用基
ch	煤焦或炭
∞	环境
特征数	
<i>Bi</i>	毕渥数
<i>Nu</i>	努塞尔数
<i>Le</i>	路易斯数
<i>Re</i>	雷诺数
<i>Pr</i>	普朗特数
<i>Gr</i>	格拉晓夫数

第 1 章

煤的热解

1.1 引言

煤的热解对煤的着火、燃烧稳定性及煤的气化有着重要意义。为此,人们对它进行了长期的、大量的研究,获得了许多有用的结果。但由于它的复杂性,至今尚有许多问题有待解决。

当煤粒进入高温炉膛后,由于受到炉内高温的加热,便开始热解(也称挥发分析出)。热解后的煤呈多孔状结构,称为煤焦(或炭)。挥发分及煤焦都会着火、燃烧,其中煤焦的燃尽足煤燃烧的主要过程。所以,煤粒进入高温炉膛后将经历加热、热解、着火与燃尽的复杂物理、化学过程。本书将对这些过程逐一进行讨论,以便揭示这些过程的规律。本章将讨论第一个重要过程——煤的热解。

实验发现,煤粒受到加热后就会软化、变形,这时外形不规则的煤粒将失去其棱角,变得更接近于球形。与此同时,煤开始分解,由大分子结构裂解成许多小分子的气态和液态产物,统称为挥发分,它包含 H_2O , C_2H_6 , CO , CH_4 , N_2 , O_2 , H_2 及焦油。它们的来源见表 1.1 所示。

煤的热解过程很复杂,要完全搞清其热解机理尚有待进一步研究。目前一般可按 Unger 和 Sunberg 等人(1981)提出的如下两阶段热解过程来理解(见图 1.1),即煤由活性结构与非活性结构两部分组成,后者不参与反应,前者则参与反应。当煤粒受热后,活性结构一方面释放出 CO_2 和 H_2O (速率系数为 $(k_i)_1$),与此同时,煤粒转变为一种称之为塑性体的中间产物(速率系数为 k_m),这是第一阶段反应。塑性体一旦形成,它将继续参与反应,产生氮气及其他各种轻气体、重烃气体和焦油等,这就是热解的第二阶段。

表 1.1 挥发分的来源

序 号	挥 发 分	煤 中 来 源
1	H ₂ O	羟基裂解
2	CO ₂	羧基裂解
3	CO	醚裂解
4	CH ₄ + C ₂ H ₆	脂肪裂解
5	焦油、液体	各种重 CH 化合物裂解
6	O ₂	氧
7	N ₂	氮
8	H ₂	芳香烃裂解

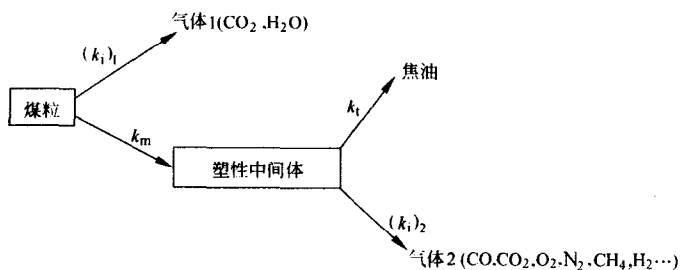


图 1.1 煤的两阶段热解模型

实际过程中发现,挥发分的成分与加热速率关系密切。根据加热速率的大小,加热过程可分为快速加热、慢速加热及中等速率加热。一般加热速率大于 10^4 K/s,且热解时间小于 1s 的热解过程,称为快速热解。煤粉锅炉中的煤粉热解就属于快速热解。加热速率在 $1\sim 10$ K/s,热解时间达几分钟以上的过程,称慢速热解。许多碳化工业及热天平分析就属于慢速热解。固定床、流化床及工业分析中煤的热解过程则介于上述二者之间,称中等速率热解。

实验证明,快速加热与慢速加热对挥发分的形成有很大影响,其挥发分析出的速率及其成分会有很大不同。有人曾对赛璐珞的热解过程进行了试验,发现在慢速加热条件下,它大部分转化为炭,但在快速加热条件下得到

的炭则很少。对煤的燃烧与气化来说,研究的侧重点是快速热解与中等速率热解过程。

挥发分的最终产量与热解速率无关,而与煤粒加热的终温关系极大。表 1.2 表示在不同热解温度下,挥发分的最终产量。由表 1.2 可知,挥发分最终产量随热解温度的增加而增加。因此挥发分含量并不是一个不变的值。工业分析所得的挥发分含量仅是一个相对值,它是在一个严格的规范条件下得到的相对挥发分含量,这在工业应用中对煤质作比较是很有用的,但它并不代表煤的挥发分含量的极限值。

表 1.2 挥发分最大产量与煤粒终温的关系

温度/K	800	1390	1720	2170
挥发分最终产量	38.3%	48%	60%	71%

实验还发现,不同的煤在热解过程中具有不同的膨胀特性,一般在氮气或还原性气氛中,其膨胀率(直径比)较大,最高可达 30%。而在氧化气氛条件下,膨胀率则较小,约为 10% 左右,甚至变化不大。其原因在于,在氧化气氛条件下,热解产生的液态产物(如焦油)迅速被氧化,不会将煤粒的孔隙堵塞,热解产物可以自由地由煤粒的孔隙中逸出,不会使煤粒膨胀。相反,在惰性气体中,热解的液态产物易将煤粒的孔隙堵塞,使热解产物难以从煤粒中逸出,从而使已软化了的煤粒膨胀,所以其膨胀率较大。当煤粒表面的液膜被胀破,热解产物逸出后,煤粒体积将收缩。对于不同的煤种,其收缩程度不同,因此其膨胀率不同。

由于煤的热解过程较复杂,难以用微观方法进行定量分析,因此本章重点在于用宏观分析的方法,找出其定量规律,为煤的燃烧与气化提供工程应用的定量理论。

1.2 煤热解的实验方法及实验的主要结果

1.2.1 实验方法

煤的热解过程十分复杂,它与许多因素有关,例如煤种、煤粒尺寸、加热速率、煤粒终温、压力、加热时间等。热解的初始产物在逸出途中可能发生二次反应,如裂解、化合、凝结和再聚合。因此,所得到的最终产物并非是最初产

物。如前所述,要从微观的角度来分析热解过程是比较困难的,目前大部分研究者是从实验入手,获得各种参数对挥发分产量与成分的影响,从而建立宏观描述热解过程的唯象动力学模型。所以实验方法是十分重要的。

国际上已对煤的热解进行了大量的实验研究。Anthony 和 Howard (1976), Howard (1981)曾作了挥发分析出的实验综述。表 1.3 是 Smoot 和 Smith (1985)以 Anthony 和 Howard (1976)的文章为基础,经补充后给出的各种实验方法和实验条件。由表中可知,影响挥发分析出速率的参数是很多的,其中温度可能是最重要的变量。

表 1.3 煤挥发分析出的实验技术与实验条件

研究者	技术	停留时间 /s	温度 /K	加热速率 /K/s	压力 /MPa	环境气	煤粒尺寸 / μm
标准工业分析 (ASTM, 1974)	坩锅	420	1220	15~20	0.1	空气 (盖好)	≤ 250
Wiser 等人 (1967)	坩锅	300~ 72000	670~770	15~20	0.1	N ₂	246~417
Portal 和 Tan (1974)	坩锅和篮	15~200	820~ 1420	0.5~250	0.1	N ₂	5~88 目
Gray 等人 (1974)	坩锅	420	1220~ 1470	0.3~20	0.1	N ₂	<200
Hiteshue 等人 (1962 a, b; 1964)	热棒	20~900	750~ 1470	10		H ₂	250~600
Feldkirchner 和 Linden (1963); Feldkirchner 和 Huebler (1965)	半流动	10~480	980~ 1200	100~300 (似乎 偏高)		H ₂ , H ₂ O	841~ 1000
Moseley 和 Paterson (1965a)	铁轨 加热器	15~165	1090~ 1220	25	1.8 ~9.5	H ₂	150~ 300
Feldkirchner 和 Johnson (1968); Johnson (1971)	热天平	几到 7200	≤ 1200	≤ 100		H ₂ , N ₂ , H ₂ O	425~800

续表

研究者		技术	停留时间 /s	温度 /K	加热速率 /K/s	压力 /MPa	环境气	煤粒尺寸 / μm
静态 试样 技术	Gardner 等人 (1974)	热天平	250~ 3000	1120~ 1220	—	35~69	H ₂	500~ 1000
	Losion 和 Chauvin (1964)	电栅网	0.7	≤ 1320	1500	真空	—	50~80
	Rau 和 Robertson (1964)	电栅网	1~1.5	1170~ 1470	600	0.1	—	250~425
	Juntgen 和 VanHeek (1968)	电栅网	0.7	≤ 1270	1500	真空	—	50~60
	Koch 等人 (1969)	电栅网	7	≤ 1770	167	真空	—	75~630
	Mentser 等人 (1970, 1974)	电栅网	0.05~ 0.15	670~ 1470	8250	真空	—	44~53
	Cheong 等人 (1975)	电栅网	$<1\sim$ 1800	570~ 1270	≤ 1000	真空~ 0.34	—	90~ 355
	Anthony 等人 (1974, 1975, 1976)	电栅网	0.1~20	670~ 1370	100~ 12000		H ₂ , He, N ₂	53~ 1000
	Graff 等人 (1975)	煤环	1~6 (气体)	870~ 1270	650	0.9	H ₂	≤ 44
	Squires 等人 (1975)		10~30 (固态)					
	Sunberg 等人 (1978)	电栅网		570~ 1370	$<3\times 10^4$		He	74~1000
	Blair 等人 (1976)	加热带		1070~ 1970	$(2\sim 8)\times$ 10^4	~ 0.11	He, Ar	500~600
	Solomon 等人 (1978)	电栅网		570~ 1570	$<10^3$	0.01	真空	>100

续表

煤 流 动 技 术	研究者	技术	停留时间 /s	温度 /K	加热速率 /K/s	压力 /MPa	环境气	煤粒尺寸 / μm
	Stone 等人 (1954)	流化床	10~2500	670~ 970	—	0.1	N ₂	200~600
	Peters 等人 (1960, 1965)	流化床	1~15	870~ 1370	300	0.1	N ₂	1000~ 3000
	Pitt (1962)	流化床	10~6000	670~ 670	—	0.1	—	200~ 600
	Jones 等人 (1964)	流化床	约 2400	700~ 1370	1000	0.1	N ₂ , H ₂ O	≤1000
	Friedman (1975)	流化床	1800~ 3600	570~ 920	—	0.1	H ₂ O	250~710
	Zielke 和 Gorin (1955)	流化床	—	1090~ 1200	—	0.1~ 3.0	H ₂ , H ₂ O	150~212
	Birch 等人 (1960, 1969)	流化床	500~ 9500	770~ 1220	—	2.1~ 4.2	H ₂	150~710
	Eddinger 等人 (1966)	悬浮流动	0.008~ 0.4	900~ 1270	2500	0.1	He	6150
	Howard 和 Eessnhigh (1967)	悬浮流动	0~0.8	470~ 1820	22000	0.1	空气	80% 小于 74 μm
	Badzioch 等人 (1967, 1970)	悬浮流动	0.03~ 0.4	670~ 1270	25000~ 50000	0.1	N ₂	20
	Kimber 和 Gray(1967a,b)	悬浮流动	0.012~ 0.34	1050~ 2270	150000~ 400000	0.1	Ar	22~50
	Belt 等人 (1971, 1972)	悬浮流动	≤1	1090~ 1310	—	0.1~ 2.82	H ₂ , N ₂	70% 小于 74 μm
	Sass (1972)	悬浮流动	几秒	810~920	10000	0.1	—	25~80
	Coates 等人 (1974)	悬浮流动	0.012~ 0.34	920~ 1640	—	0.1	H ₂ , H ₂ O 等	≤74