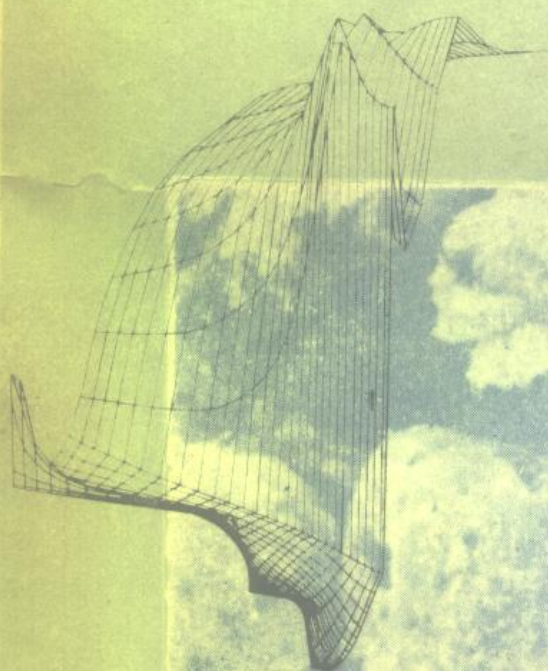


(美) L. D. 斯穆特 著
P. J. 史密斯

煤的燃烧与气化

科学出版社



煤的燃烧与气化

〔美〕 L.D. 斯穆特 P.J. 史密斯 著

傅维标 卫景彬 张燕屏 译

周力行 校

科学出版社

前 言

煤的利用有助于解决世界能源的供需矛盾。煤是一种难于有效且洁净利用的矿物燃料。但我们相信，在深入了解煤燃烧所产生的基本物理和化学过程的基础上，通过改进技术，煤的洁净且有效的利用的程度将会得到提高。本书的主要目的就是介绍这一技术的现状。

过去描述和分析燃煤炉及燃烧器的技术极大地依赖于对传热过程中的复杂流和化学反应的经验知识。随着人们对控制燃烧产生的空气污染问题的关注程度的增长，越显得人们对有关的基本物理和化学机理缺乏了解。最近计算机的运算速度、存储量、湍流回流流动、两相流及伴随有化学反应的流动的数值预报等方面的技术的新进展，为更详细地描述和模拟这类复杂燃烧系统提供了新的可能性。我们相信，对煤燃烧过程进行更基本的描述所需的大部分模型是可以建立的。全世界对煤的利用都有着浓厚的兴趣，而且煤反应过程的模拟方法已经取得了稳定的进展。

在过去十年中，我们一直从事煤的燃烧和气化过程的研究工作。这项工作包括了基本测量和模型分析两部分。在模拟工作中，我们试图根据通用守恒方程来发展基本模型，并以能获得的、最适用的文献资料作为子模型和参数的来源。这本新书的主要目的之一是为粉煤燃烧系统提供通用的模拟方法。该模型侧重于描述气相携带细煤粉颗粒的各种过程。特别使人感兴趣的问题是粉煤炉、电站锅炉、悬浮式煤气化器、燃煤磁流体发电机中的燃烧以及层流和湍流煤粉气流混合物

的火焰传播。此外,本书还综述了其他研究者对悬浮床、沸腾床和固定床中燃烧和气化所进行的模拟工作,并简要讨论了与油页岩、沥青砂及其他矿物燃料有关的燃烧问题。

本书是已出版的有关煤的燃烧及气化的第二本书(第一本书参见 Smoot 等 1979 年编写的纽约 Plenum 出版公司出版)。对粉煤燃烧模型来说,本书的作者在前一本书中已提供了详细的模拟基础。前一本书重点介绍反应、湍流或层流、多相流系统的一般原理;研究并归纳通用守恒方程;提出复杂的多相混合物中热化学平衡的计算基础以及对输入数据进行快速计算的技术;讨论速率过程,包括湍流、化学动力学、辐射传热和气-固的对流-扩散的相互作用等各方面的问题。

本书与前一本书相比,在几个重要方面有所不同。本书的研究范围已扩展到包括固定床和流化床过程特性方面的内容。对含有煤粉的系统湍流和化学反应之间相互作用的详细剖析是本书的一个新的重点。本书可作为高等教科书,也可供从事矿物燃料燃烧和气化方面工作的人员参考和作为原始资料。每一章末尾包括了求解的专门习题。在全书中采用了统一的符号和文献目录。

本书分为五大部分:

1. 第一至二章研究煤的处理过程和煤的一般特性。

2. 第三至五章讨论煤粒的基本反应过程,包括煤的挥发份析出、炭的氧化及挥发份燃烧。其中某些题目已在前一本书中讨论过,但在本书中得以更新并被大大地扩展了。本书在论述加热和着火方面增添了新的内容。

3. 第六至八章涉及矿物燃料实际的燃烧火焰的有关内容。首先根据火焰的类型来划分燃烧过程,然后对每一过程进行较为仔细的研究,特别侧重研究煤粉火焰,用燃烧和气化的最新实验资料来说明火焰的特性。这几章还包括了固定

床、流化床及悬浮床模拟方法的评价和各种预报方法所用数据的综述。

4. 第九、十和十四章提供了湍流燃烧系统的基本方程和背景。

5. 第十一至十三和十五章较详细地阐述了反应系统中化学和湍流之间相互作用的研究方法和理论,这些反应系统包含着气相火焰、含煤粒系统和这些系统中的污染物的形成。

本书为我们燃烧实验室的模拟研究工作奠定了基础。在第一本书中已一般性地讨论了这些基础。在这本新书中对控制方程和辐射的处理没有多大改变,但对有化学反应的湍流非均相系统及氮氧化物污染的形成增添了重要的新材料。

有些章节包含了测量结果与在燃烧实验室中发展的综合模型预报结果的比较。这些比较证明了(以作者的观点来看)适合于粉煤系统中某些实验应用的综合程序的发展状况。尽管这一方法主要是针对粉煤燃烧和气化进行研究的,但此方法及类似的方法有着广泛的通用性。这一程序可直接用于无反应的气体、含颗粒流动以及有反应的气体系统。煤浆方面的应用正在进展中,而用于液体燃料火焰只需作少量的工作。

作者认识到在这类模型的构造和使用中的一些不确定性。煤是非常复杂的非均匀物质,其构造和特性变化很大,人们对它的认识还不很清楚。煤的热解和氧化与煤种、尺寸、尺寸分布及温度历程有关,因此要使之通用化是很困难的。此外,湍流回流流动、湍流反应流动及湍流两相流动的复杂情况还未完全弄清。只是在最近,回流流动的计算才成为可能。适用于湍流模型的通用参数还没有很好地确定。对湍流与化学反应间的非常重要的相互作用的研究还非常少。有些重要的不确定性还与气体湍流对颗粒运动的影响有关。人们已经

知道,气体的随机脉动是使颗粒弥散的主要动力,但这一影响的研究尚处于形成阶段。

最后,以前很少探索将这几方面联合起来的模型。为此,粉煤系统的模型必须通过与实验测量结果的比较来加以验证。仅有出口处气体的或炭的成分或者温度测量还不足以对这种模型进行检验,至少是反应器内局部特性的时平均值分布才能为模型的检验提供更可信的数据依据。这些测量已成为本书作者及他的同事们所从事的研究计划的一部分,并正在取得进展,其中某些结果已在本书中给出,并与本书的模型预报进行了比较。这些测量包括层流、预混煤粉-空气火焰、甲烷-空气火焰的数据测量,以及在悬浮气化器和燃烧器中气体的炭成分的现场测量,而且已经有了剖面的测量。对于无化学反应的含颗粒的回流流动的测量也正在进行。根据这些测量结果和其他一些研究者的测量结果与模型预报的比较,我们可以对无化学反应状况下的颗粒和气流流动进行评价。

在我们实验室进行的、作为本书基础的许多研究工作受到了美国政府和工业部门的支持。我们特别对美国能源部(Morgan 城能源技术中心及 Pittsburgh 能源技术中心)、电力研究所(矿物燃料局)、国家科学基金委员会、Tennessee 流域管理局以及 Utah 州电力和照明公司对于粉煤系统的测量和模型研究的合同及给予的支持表示感谢。我们还要对杨伯翰大学的工业技术学院和研究所对研究的财政支持及协助进行本书手稿的准备工作表示感谢。我们也要对 Elaine Alger 为手稿的打印和编辑工作以及对 Daniel Gleason 先生所做的插图工作表示感谢。还应该对 Exxon 公司、Los Alamos 国家实验室、Morgan 城能源技术中心为作者在这些单位进行的技术讲座所用的部分材料的准备所给予的财政资助表示感谢。第一至五章中的许多材料原先是应 Exxon 公司的请

求准备的，他们特许在本书中使用这些材料。我们还十分感谢燃烧研究室的教工同事和研究生们，他们为准备本书中许多有关材料作出了重要的研究性贡献。

目 录

前言

第一章 引论..... (1)

1.1 目的 (1)

1.2 研究范围 (2)

1.3 方法 (3)

1.4 一般参考文献 (3)

第二章 固态矿物燃料（主要是煤）的处理过程及

性质..... (7)

2.1 煤的获得及利用 (7)

2.2 煤的处理过程 (9)

2.3 煤浆 (10)

2.4 煤的扩大利用所带来的问题 (15)

2.5 煤的特性 (15)

2.5.1 煤的形成与变化..... (15)

2.5.2 煤的分类..... (19)

2.5.3 煤的物理和化学性质..... (19)

2.5.4 煤的结构特性..... (23)

2.5.5 矿物质的清除..... (29)

2.6 煤浆的性质 (29)

2.7 其他固态和液态矿物燃料的性质 (33)

习题..... (34)

第三章 煤粒的着火与挥发份析出..... (38)

3.1 引言与研究范围 (38)

3.2 煤反应的组成	(39)
3.3 着火	(42)
3.3.1 背景	(42)
3.3.2 着火理论	(44)
3.3.3 着火数据	(46)
3.4 煤粒的加热及温度	(50)
3.4.1 加热过程	(50)
3.4.2 测量结果	(51)
3.4.3 预报	(54)
3.5 挥发份析出	(57)
3.5.1 实验研究	(57)
3.5.2 挥发份析出模型	(65)
3.5.3 高水分含量的影响	(73)
3.6 挥发份燃烧	(75)
3.6.1 背景	(75)
3.6.2 实验数据	(76)
3.6.3 计算方法	(78)
3.6.4 挥发份氧化反应速率	(80)
习题	(82)
第四章 焦炭的非均相反应过程	(84)
4.1 反应变量	(84)
4.2 总体反应速率	(88)
4.2.1 焦炭的氧化数据	(88)
4.2.2 煤中水分对焦炭氧化的影响	(97)
4.2.3 矿物质的影响	(98)
4.2.4 焦炭氧化的总体模拟	(99)
4.3 焦炭的内在反应速率	(103)
4.3.1 背景	(103)
4.3.2 内在反应速率数据	(104)
4.3.3 内在反应性的初步(宏观)模型	(108)

4.3.4 内在反应性的扩展(微观)模型·····	(112)
4.4 煤粒反应的其他方面的问题·····	(117)
习题·····	(117)
第五章 实际火焰中煤的燃烧 ·····	(120)
5.1 引言和研究范围·····	(120)
5.2 实际火焰的分类和描述·····	(121)
5.2.1 火焰分类·····	(121)
5.2.2 经典的火焰类型·····	(123)
5.3 实际过程的火焰特点·····	(127)
5.4 实际火焰中的物理和化学过程·····	(130)
5.4.1 火焰过程·····	(130)
5.4.2 粉煤扩散火焰·····	(131)
5.4.3 煤浆扩散火焰·····	(143)
5.4.4 预混火焰·····	(150)
习题·····	(160)
第六章 实际火焰中煤的气化 ·····	(161)
6.1 引言和研究范围·····	(161)
6.2 过程的基本特点·····	(162)
6.2.1 基本反应·····	(162)
6.2.2 气化过程的分类·····	(164)
6.2.3 与燃烧比较·····	(166)
6.3 气化中的物理和化学过程·····	(166)
6.4 气化器的数据·····	(169)
习题·····	(173)
第七章 煤处理过程的模拟 ·····	(174)
7.1 背景和研究范围·····	(174)
7.2 基本模型的原理和前提·····	(175)
7.3 栓塞流模型·····	(179)
7.3.1 模型的假设·····	(179)

7.3.2	微分方程	(182)
7.3.3	辅助方程	(184)
7.3.4	模型的预报和比较	(186)
7.4	火焰的多维程序	(189)
7.4.1	基本描述	(189)
7.4.2	子程序的一般描述	(190)
7.4.3	程序的研究	(191)
7.5	其他的粉煤程序	(192)
7.6	固定床燃烧模型	(196)
7.6.1	背景	(196)
7.6.2	一维固定床模型	(203)
7.6.3	固定床模型: 评价和应用	(209)
7.7	流化床模型	(210)
7.7.1	背景	(210)
7.7.2	一维 FBC 模型	(211)
7.7.3	二维 FBC 模型	(215)
7.8	对模拟的某些看法	(222)
	习题	(223)
第八章	综合模型的评价	(226)
8.1	背景和研究范围	(226)
8.2	评价方法	(226)
8.2.1	数值评价	(227)
8.2.2	敏感性分析	(230)
8.2.3	趋向分析	(234)
8.2.4	与综合测量数据的比较	(234)
8.3	用于模型估价的详细的当地测量数据	(235)
8.3.1	实验数据的要求和类别	(235)
8.3.2	所考察和选择的实验数据的工况	(236)

8.4 进一步需要的实验数据	(244)
习题	(244)
第九章 基本模型方程	(246)
9.1 引言	(246)
9.1.1 连续介质假设	(247)
9.1.2 欧拉和拉格朗日参考系	(250)
9.2 雷诺输运定理	(251)
9.3 欧拉方程	(254)
9.3.1 表述	(254)
9.3.2 通用连续介质方程	(256)
9.3.3 解耦的气体 and 固体方程	(258)
习题	(261)
第十章 湍流	(262)
10.1 引言	(262)
10.2 封闭问题	(264)
10.3 Pr 混合长度	(267)
10.4 单方程封闭模型	(268)
10.5 k - ϵ 模型(双方程封闭模型)	(270)
10.6 湍流应力封闭模型	(278)
10.7 带颗粒射流的效应	(280)
10.8 边界条件	(281)
10.8.1 k 的边界条件	(281)
10.8.2 ϵ 的边界条件	(283)
习题	(284)
第十一章 气相燃料的化学与湍流	(285)
11.1 引言	(285)
11.2 平均反应速率	(286)
11.2.1 A型: 反应时间尺度 $\gg$ 湍流时间尺度	(288)
11.2.2 B型: 反应时间尺度 $\ll$ 湍流时间尺度	(289)

11.2.7 C型: 反应时间尺度 $\approx$ 湍流时间尺度	(290)
11.3 混合物分数	(291)
11.4 概率密度函数 (PDF)	(293)
11.5 Favre 平均	(298)
11.6 混合	(300)
11.7 化学平衡	(304)
11.8 B型火焰的非平衡态化学	(308)
11.9 算例	(311)
习题	(316)
第十二章 湍流流动中颗粒和液滴的反应	(319)
12.1 引言	(319)
12.2 处理方法	(320)
12.3 颗粒的拉格朗日描述方法	(322)
12.4 湍流颗粒扩散	(326)
12.5 颗粒反应	(335)
12.6 颗粒源项	(340)
习题	(342)
第十三章 煤反应产物的化学和湍流	(343)
13.1 引言	(343)
13.2 煤-气混合物分数	(344)
13.3 平均化学性质	(348)
13.4 概率密度函数	(357)
13.5 能量平衡考虑	(360)
13.6 问题和研究需求	(364)
习题	(372)
第十四章 辐射传热	(373)
14.1 引言	(373)
14.2 基础	(375)

14.2.1 强度	(375)
14.2.2 发射功率	(377)
14.2.3 吸收	(379)
14.2.4 散射	(381)
14.3 通用方程	(384)
14.4 求解方法	(384)
14.4.1 Hottel的分区法	(385)
14.4.2 Monte-Carlo法	(385)
14.4.3 扩散法	(386)
14.4.4 通量法	(386)
14.4.5 推荐的通量法	(387)
14.5 系数	(391)
习题	(397)
第十五章 湍流煤燃烧系统中 NO_x 污染物的生成	
	(398)
15.1 引言	(398)
15.2 机理	(400)
15.2.1 煤的挥发份析出过程	(401)
15.2.2 NO 的均相生成	(402)
15.2.3 NO 的非均相反应	(405)
15.3 湍流脉动	(405)
15.3.1 组分的连续性	(405)
15.3.2 时均反应速率	(407)
15.4 计算	(412)
15.5 必要的新测量	(430)
习题	(431)
附录	(433)
符号表	(436)
参考文献	(444)
索引	(465)

第一章 引 论

1.1 目 的

本书论述煤、炭、煤-水混合物(CWM)及其他固态矿物燃料的反应过程,讨论这些固态矿物燃料的性质及其应用,研究和模拟煤粒的物理和化学反应过程并将这些结果用于描述煤的各种过程.

本书的主要目的是:

1. 评述煤的现有的和潜在的用途以及最常用的处理方法.
2. 识别固态矿物燃料的一般的化学和物理性质,重点说明这些天然物质的复杂性和易变性.
3. 总结在扩大煤和其他固态矿物燃料的应用过程中提出的主要问题.
4. 说明颗粒尺寸、加热速率、温度、压力和氧化剂的种类等主要参数对煤粒反应速率的影响.
5. 概述关于在湍流环境中模拟煤粒反应的现有的可用方法,包括着火、挥发份析出、挥发份的气相反应及异相氧化反应.
6. 识别煤在各种处理过程(包括直接燃烧和煤的气化)中煤粉火焰的特性及其控制方法.
7. 对湍流及其与化学反应、辐射及相关的基本问题之间的相互作用的讨论,为描述复杂的、有化学反应的含颗粒系统提供基础.
8. 概述模拟湍流中煤反应过程的一般方法,并通过一维和二维模型的应用给以说明.

9. 提供阐明计算方法的应用实例。

10. 将上述结果应用于煤的各种不同处理过程。

1.2 研究范围

煤反应过程的研究涉及的内容广泛，包括下列或与下列有关的课题：

1. 煤的起源及其地质特性。

2. 煤的化学和物理性质及其分类。

3. 煤的结构和成分与煤反应过程的关系。

4. 煤与其他固态矿物燃料及固态派生的矿物燃料（如油页岩或提炼的溶液煤）的关系。

5. 煤的热解及其与煤种、颗粒尺寸、加热速率、温度等的关系。

6. 煤的挥发份的性质和化学成分及它们与煤种、加热速率、温度等的关系。

7. 煤的挥发份在湍流气相中的化学反应，包括烟粒子的形成，碳氢化合物的裂解等。

8. 在挥发份析出期间炭的形成，包括膨胀、软化、开裂、内表面的形成等。

9. 炭粒的反应，包括内部和外部的氧化剂向颗粒的扩散过程，挥发份对于气体的释放、表面反应和产物扩散的影响。

10. 湍流流动、弥散及煤浆的蒸发与反应。

11. 湍流环境中各种污染成分的形成与控制，包括氮氧化物及它们的先驱物、硫氧化物、碳氧化物、严重的致癌碳氢化物、二氧化碳、挥发物中的痕量金属、微小粒子等。

12. 煤的辐射过程及其固态产物（即烟粒子、灰、渣和炭）和气态产物（例如 CO_2 和 H_2O ）。

13. 灰和渣粒子的形成, 它们的尺寸变化, 以及它们的控制和消除.

14. 与壁和表面的相互作用, 包括灰或渣层的形成.

15. 颗粒与气体的相互作用, 包括对流与辐射传热, 反应物和产物的扩散, 以及颗粒在湍流气体介质中的运动.

16. 煤反应过程的设计及优化.

17. 其他.

本书论述固态矿物燃料和煤-水混合物, 着重论述细微粉煤的反应过程. 在现有煤的燃烧方式中, 这种形式的煤是主要的. 本书还讨论较大煤粒燃烧方式的处理, 详细地研究了煤的反应, 讨论将这些反应结果应用于煤反应过程的模拟, 并用一维和二维模型对此进行说明.

1.3 方 法

本书努力将燃烧的基础研究应用于处理煤的反应过程, 并力图识别煤的性质、煤粒的基本反应以及湍流流动(这是实际燃烧过程中常常遇到的)中煤火焰特性之间的关系.

书中所选择的实验数据是为了说明煤的典型特性和反应速率. 然后, 在可能的条件下, 发展和推广了整理这些实验数据的各种现有方法. 这些整理和预报的方法被综合在描写煤反应过程的方法中. 其中某些例题是煤的模拟方法的应用.

1.4 一般参考文献

大约 20 年前出版的、由 Lowry 编辑的多卷丛书《煤利用化学》曾提供了关于煤的起源、性质、化学反应及煤的各种过