

流化床的燃烧和应用

〔英〕 J. R. 霍华德 主编

13

科学出版社

流化床的燃烧和应用

〔英〕J. R. 霍华德 主编

张宝诚 译

赵惠富 校

科学出版社

1981.8

内 容 简 介

对于发电和工业锅炉的煤,特别是对储量丰富、价廉但较难有效和干净地用其它办法烧净的低品位煤和其它劣质燃料来说,流化床是一种有效的燃烧技术。本书综述了流化床方面的文献资料,它阐述了流化床基本原理和怎样把基本原理运用到能源利用和节能过程中去,同时也介绍了各种技术应用和满足环保标准的有关问题。多数章节的内容与煤的燃烧有关,但也阐述了液体和气体燃料的燃烧技术,其中包括了诸如冶金炉、煅烧、烘干和余热回收等内容。

本书是一本很好的指导性读物,可供从事工业燃烧、动力、燃料和化学工程、冶金、工业热处理的工程技术人员,科研和教学人员,高等院校有关专业的高年级学生,研究生及动力经济管理人员参考。

J. R. Howard Ed.
FLUIDIZED BEDS
Combustion and Applications
Applied Science Publishers
1983

流化床的燃烧和应用

〔英〕J. R. 霍华德 主编
张宝诚 译
赵惠富 校

责任编辑 陈文芳 顾锦梗 李雪芹

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

北京景山学校印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1987年4月第一版 开本: 787×1092 1/32

1987年4月第一次印刷 印张: 13 1/8

印数: 0001—2,200 字数: 297,000

统一书号: 15031·799

本社书号: 4926·15—10

定价: 3.10元

序

现在可以有理由断言，流化床燃烧是燃烧矿物燃料唯一现实的新方法，虽然流化床方法问世至少有六十年。早在1962年，当已故的道格拉斯·埃利奥特 (Douglas Elliott) 还是中央电力局一个研究实验室的一名工作人员时，他就曾认识到在矿物质流化床内烧煤的一些潜在优点，在这种床内炉管表面是浸没的。尽管他不是具有流化床燃烧设想的第一个人（不可能肯定谁是第一个），但是可以肯定，是他开创了西方世界流化床燃烧现今的活跃局面。然而，在六十年代早期，社会上的思潮不利于流化床技术应用到发电上去；当时倾向于核发电的势头在不断增长，廉价油的来源也充足，海外有关二氧化硫和 NO_x 排放物的法规还未开始制订（这些排放物污染的问题尚未被充分认识到），以及更迷人的磁流体动力发电系统吸引了英国当时在研究和开发立足于烧煤新途径方面的主要力量。在中央电力局，道格拉斯·埃利奥特的试验计划与当时的潮流相抵触，但他对别处的研究工作则不断产生影响。

我在1952年首次遇到道格拉斯，当时我们两人都从事于英国燃料动力部有关燃气轮机烧煤的计划。后来，在开发煤的利用活动领域里我们屡次在一起从事一些课题，如煤的气化用于联合循环发电厂、磁流体发电的高强度燃烧，特别是后期在英国煤炭利用研究协会莱瑟赫德 (Leatherhead)，又一起卷入到流化床燃烧的研究之中。

上述研究领域的一个重要例外情况是研究流化床燃烧用于工业蒸汽发电。此课题于1964年在莱瑟赫德开始，但当时我

39766

他们没有意识到道格拉斯对流化床燃烧技术已有重大的贡献。

道格拉斯、阿伦·罗伯茨 (Alan Roberts) 和我之间的强有力结合是一次交谈的结果，那是1967年年底在中央电力局马尔伍德 (Marchwood) 试验室停车场内的一次交谈。我们当场确信，若在增压下实现燃气蒸汽联合循环，那么采用流化床燃烧发电将会提供最大的经济效益。道格拉斯·埃利奥特鼓励在莱瑟赫德接着建立一个中间试验装置的计划，他主持了包括中央电力局、国家煤炭局和英国煤炭利用研究协会一些成员的非正式小组，指导了早期阶段的工作，奠定了这一领域后来许多的研究和发展规划的基础。

在伯明翰 (Birmingham) 的阿斯顿 (Aston) 大学富于创造性的环境里，道格拉斯继续努力扩大流化床燃烧技术的应用范围，奠定了流化床燃烧设备公司所制造的锅炉和热处理装置商用领域的基础，又为流化床燃烧技术的教学和培训创造了条件，这些都将是有益于后代。

道格拉斯·埃利奥特是一位非凡的人，他鼓励所有他可以要求的那些熟人。他的预见性见解和他为达到某一目标所显示出的热情推动着所有与他共事的人。我没有意想到流化床燃烧系统今天的风行，竟再不会有任何机会由他来评述这项技术的盛况。

1976年，道格拉斯的过早去世使他未能看到流化床技术的大量应用和商品化。虽然他对迄今为止所取得的进展会感到满意，但是他多半会对更具潜在效益的一些应用在当时没有坚持到底而恼怒，的确当时有一些课题已达到示范阶段。

我希望这本书，作为他的一些朋友献给他的一个礼物，将鼓励大家为实现他的目标而不断取得进展。

H. R. 霍伊 (Hoy)

英国国家煤炭局煤炭利用研究实验室主任

前 言

1976年6月16日，道格拉斯·埃利奥特教授的过早去世对他的夫人和孩子、他的数不尽的朋友和同事是悲哀的，而对技术上的同行们更为痛心，当时正一度面临困境而且还难以招架。类似道格拉斯那样的工程师是罕有的，他是他的同代人中最有洞察力和创造力的一个。

编撰这本书大约是在他死后不久的第一个设想。当时道格拉斯·普罗伯特(Douglas Probert)接替他担任“能量应用杂志”的编辑，普罗伯特曾推断，五至六年后可能是着手编一本书纪念道格拉斯·埃利奥特的良好时机，因为到那时，他贡献那么大的流化床技术已处于工业规模示范的初始阶段。编书这样一类任务显然需要许多内行的协助。本书就是他们的劳动成果。所有的作者都知道他自己是我个人的朋友、同事和合作者。我深深地感谢所有的，一度极为慷慨地付出他们的时间和专业知识的人，他们是在最需要的时候提供帮助的，他们是流化系统的志同道合者，他们的热忱是对圣约书的高度尊重。道格拉斯·埃利奥特留在他的同代人的心里。他们所编的章节里阐述的一些观点均是作者自己的看法，并不一定是他们供职机关的观点。不过，我要感谢所有给予合作的机关，由于他们的协助，使本书得以完成。

道格拉斯卷入流化床研究的历史开始于五十年代末和六十年代初，当时他就职于中央电力局的马尔伍德工程试验室。他着手做了一些试验，这使他亲自重新发现了流化床燃烧并且使他直接看到了这种燃烧方式的潜力。这项研究的目

的是为发电和工业锅炉探讨利用煤的更经济的系统。与这种装置有关的所有因素可用“经济性”一词来概括，这包括减少投资和维护费用及非常重要的环境保护条例。

1969年在道格拉斯被任命为伯明翰阿斯顿大学机械工程教授后的就职演说中，他希望为了增加煤的利用而要寻求新的方式。这次演讲的题目叫“煤能够竞争吗？——为电力而奋斗！”，所阐述的一些技术论据成为当时电力战略的依据。在此后十三年的岁月里，经济和政治形势方面的重大事件及变更经常打乱专家们的预言和他们所提议的政策。而道格拉斯的基本观点直到今天仍然是合适的，并且现已得到政府和能源用户的支持。今后关于增加煤的利用问题已变成了一个需要优先加以考虑的紧急课题。流化床技术就是朝着实现这一目标，特别是燃用劣质煤及低等级燃料的一个重大环节。这些燃料遍布全世界，而且便宜，但用其它方法却难以燃烧，特别是当今清洁、无污染燃烧又是主要的要求。

然而，正如本书的一些章节所指出的那样，流化床技术并不只是局限于煤的燃烧；液体燃料和可燃气也都能燃烧，这种技术已应用到煅烧、烘干、冶金炉及回热系统。

虽然流化床应用到燃烧、气化和化工过程方面的文献是大量的，可是仍希望本书对工程师、大学生以及确实想迅速掌握流化床基本原理的任何人都有价值，它向您介绍如何把这些原理运用到节能和能量利用过程中去，而与此同时还要满足环境保护所要求的标准。

J. R. 霍华德 (Howard)

作者表

J. S. M. 博特里尔

伯明翰大学 化学工程系

英国 伯明翰 埃奇巴斯顿(Edgbaston)BI 5 2 TT 信箱号363

J. 布劳顿

通用电气公司 燃气轮机有限公司

英国 累斯特城 (Leicester) 惠茨通 (Whetstone) 剑桥路
LE 8 3 H

J. 海利

国家煤炭局 煤炭研究院

英国 格洛斯 (Glos) 切尔特恩哈姆 (Cheltenham) 斯托克
(Stoke) 果园GL52 4RZ

J. R. 霍华德

伯明翰 阿斯顿大学 机械工程系

英国 伯明翰 戈斯达 (Gosta) 格林 (Green) B4 7ET

W. G. 凯耶

国家煤炭局 煤炭研究院

英国 格洛斯 切尔特恩哈姆 斯托克果园 GL52 4RZ

G. 莫斯

埃索 (Esso) 石油公司子公司 埃索研究中心

英国 牛津郡 (Oxfordshire) 阿宾登(Abingdon) OX13 6AE

K. K. 皮拉尔

国家煤炭局 煤炭利用研究实验室转交

英国煤炭利用研究协会有限公司

英国 萨里 莱瑟赫德 兰德尔斯(Randalls) 路 KT22 7RZ

A. G. 罗伯茨

国家煤炭局 煤炭利用研究实验室转交

英国煤炭利用研究协会有限公司

英国 萨里 莱瑟赫德 兰德尔斯路 KT22 7RZ

J. T. 肖

国家煤炭局 煤炭研究院

英国 格洛斯 切尔特恩哈姆 斯托克果园 GL52 4RZ

A. M. 斯夸尔斯

弗吉尼亚 (Virginia) 州立大学 弗吉尼亚工业研究所

美国 弗吉尼亚 布莱克斯伯格 (Blacksburg) 24061

J. E. 斯坦坦

国家煤炭局 煤炭利用研究实验室转交

英国煤炭利用研究协会有限公司

英国 萨里 莱瑟赫德 兰德尔斯路 KT22 7RZ

M. J. 弗尔

斯通 (Stone) - 普拉特 (Platt) 流化燃烧设备有限公司

英国 中西部省 布赖尔利 (Brierley) 希尔 (Hill) 彭斯纳
特 (Pensnett) 贸易区, 第二条街 56 DY6 7PP

目 录

序

前言

作者表 (vii)

第 一 章 流化床特性.....
..... J. S. M. 博 特 里 尔 (Botterill) (1)

第 二 章 流化床中煤的燃烧.....
...J. 布劳顿 (Broughton) 和 J. R. 霍华德 (37)

第 三 章 流化床工业锅炉和窑炉.....
...J. 海利 (Highley) 和 W. G. 凯耶 (Kaye) (81)

第 四 章 增压流化燃烧.....
..... A. G. 罗伯茨, K. K.
皮拉尔 (Pillal) 和 J. E. 斯坦坦 (Stantan) (180)

第 五 章 流化床燃烧的固硫.....
..... J. E. 斯坦坦 (208)

第 六 章 氮氧化物的排放.....
..... J. T. 肖 (Shaw) (236)

第 七 章 载氧体的气化过程.....
..... G. 莫斯 (Moss) (267)

第 八 章 三位突出的煤气化的开拓者: 温克勒 (Winkler)、
戈德尔 (Godel) 和波特 (Porta) 法
..... A. M. 斯夸尔斯 (Squires) (281)

第 九 章 流化床内可燃气的燃烧.....
..... J. 布劳顿 (309)

第 十 章	流化床冶炼炉.....	
	M. J. 弗尔 (Virr) (324)	
第十一章	流化床回热系统.....	
	M. J. 弗尔 (342)	
索引		(366)

第一章 流化床特性

J. S. M. 博特里尔

英国伯明翰大学化学工程系

符号表

A_b	床层横截面积 (m^2)
C_g	气体比热 (J/kgK)
d_B	气泡直径 (m)
d_f	相邻筛网算术平均孔径 (m)
d_p	粒径 (m)
D_b	床径 (m)
F	$<45\mu\text{m}$ 床料的重量分数
g	重力加速度 (m/s^2)
h_{gc}	床层对受热面换热系数中的交界面处气体对流换热系数分量 ($\text{W/m}^2\text{K}$)
h_{gp}	气体对颗粒换热系数 ($\text{W/m}^2\text{K}$)
h_{max}	床层对受热面最大换热系数 ($\text{W/m}^2\text{K}$)
h_{mf}	临界流化情况下床层对受热面的换热系数 ($\text{W/m}^2\text{K}$)
$h_{总}$	床层对受热面总换热系数 ($\text{W/m}^2\text{K}$)
h_{po}	床层对受热面换热系数中颗粒对流换热系数分量 ($\text{W/m}^2\text{K}$)
h_{rad}	床层对受热面换热系数中辐射换热系数分量

(W/m²K)

k	常数
k_g	气体导热系数 (W/mK)
m	床中颗粒质量 (kg)
ΔP_b	通过床层的压降 (N/m ²)
ΔP_D	通过布风装置的压降 (N/m ²)
T_b	床温 (K)
T_s	受热面温度 (K)
U	气体面积流速 (m/s)
U_B	单个气泡上升速度 (m/s)
U_m	床层对受热面最大换热时气体速度 (m/s)
$U_{\max}$	不产生气栓的最大运行速度 (m/s)
U_{mB}	临界鼓泡速度 (m/s)
U_{mf}	临界流化速度 (m/s)
U_t	颗粒终端速度 (m/s)
X	质量分数
ε_b	床层辐射系数
ε_m	考虑床温受相邻浸入表面影响的修正辐射系数
ε_{mf}	临界流化时空隙率
ε_r	折算辐射系数
ε_s	表面辐射系数
ϕ	厄冈(Ergun)方程(参考文献[201])中颗粒形状因子
ρ_f	流体密度 (kg/m ³)
ρ_g	气体密度 (kg/m ³)
ρ_p	颗粒密度 (kg/m ³)
μ_g	气体动力粘度 (kg/ms)
Ar	阿基米德(Archimedes)数, $d_p^3 \rho_g (\rho_p - \rho_g) g / \mu_g^2$
Nu	努赛尔(Nusselt)数, $h d_p / k_g$

Nu_{gc}	基于 h_{gc} 的努赛尔数
Nu_{gp}	基于 h_{gp} 的努赛尔数
$Nu_{m,s}$	基于 $h_{m,s}$ 的努赛尔数
Pr	普朗特 (Prandtl) 数, $C_g\mu_g/k_g$
Re	雷诺 (Reynolds) 数, $d_p U \rho_g / \mu_g$
Re_{mf}	基于 U_{mf} 的雷诺数
Re_{opt}	基于 U_m 的雷诺数

1. 引言

1.1 流化现象

人们常常列举流化技术的种种优点 (例如, 见博特里尔的著作^[1]), 而这些优点主要是由于很大的颗粒表面受到流体的作用, 从而轻易地使颗粒维持在流化状态。此外, 鼓泡气体流化床所具有的良好换热特性, 也是本书所涉及的传热应用方面。当然, 流化技术也难免有一些缺点, 诸如运行效率受到床层能被流化的范围的限制; 使床流化消耗的泵功率可能过大, 尤其是在一些深床情况下就更大; 可以使用流化技术的颗粒大小和种类有一定限制, 正如本章将强调的, 用颗粒自身的特性来表征是困难的, 而且流化床的运行特性随工况的不同而变化很大。要想更全面地了解流化床特性和设计, 请参考吉尔达德 (Geldart) 的著作^[2]《气体流态化》。

流体通过颗粒床时床层对流体产生阻力。随着流速的增加作用在这些颗粒上的阻力也增加。当流体向上流过不受约束的床层时, 颗粒会重新分布, 减少它对流体的阻力。如果床层不是由大颗粒 (平均粒径大于1mm) 组成的话, 它就会膨胀。随着流体向上流速的进一步增加, 床层会继续膨胀, 一直到作用在颗粒上的阻力足以托住床层中颗粒的重量时为止。

(图1).于是流体-颗粒系统开始出现流态化特性,并且在流体静压头的作用下流动,这是流化的起点以及气流要达到的所谓临界流化速度 U_{mf} 。当超过这一速度,通过床层的压降

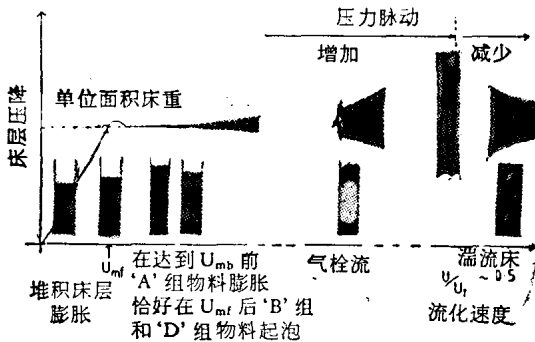


图 1 床层压降随气体速度变化示意图

就近似地等于单位面积的床重,即

$$\Delta p_b A_b = \frac{m}{\rho_p} (\rho_p - \rho_f) g \quad (1)$$

式中 ρ_p 为多孔颗粒有效密度, ρ_f 为流体密度。有效压降 ΔP 不包括通过床层的流体静压降,而在常压下运行的气体-流化系统中,可以忽略静压降。然而为了克服颗粒间的内聚力和破碎床中残余的堆积物料以及颗粒的互联,这个压降可能要超过气体-流化系统临界流化前的压降。当在更加极端的大风量工况下运行时,此时形成的颗粒气栓将增大(见下文),而为了加速这种过程,也有可能超过这个压降。当床层由宽筛分粒径分布的粉料组成时,这个压降是决不可能完全等于单位面积的床重,这就同时说明不是所有的床层都能随意地由气流来托住的。

不管流体是气体或是液体,流化开始时,床层都近乎是均匀膨胀,直到它的特性与普通床没有多大差别时为止。然而就液体流化床来说,在颗粒没有被夹带流出床层以前,随向上

流速的进一步增加,床层不断地稳定膨胀,但除了细粉料以外,这种均匀膨胀特性随流速的增加会立即消失。因此在气体-流化系统中,不稳定性在发展并且形成含有少量颗粒的空穴。这些空穴很象沸腾液体中的蒸汽泡,当它们通过床层上升时,引起了颗粒的混合,这是气体流化床特性的重要特征^[3]。在开始流化和沸腾刚开始的流动范围内,可以说床层处于静止状态。

在高流速工况,甚至在达到气力输送范围之前,许多物料由于扬析离开床层而损失掉。表面处的气泡破裂产生压力脉动,把雾状颗粒抛到床层上部的自由空间*。随床层上部自由空间中粒径分布和气流速度的不同,许多颗粒被气流带走。为了增加物料通过量并得到更有利的符合实际情况的反应条件,人们对在更高流速下可能运行的床,如湍流和快速流化床^[4](图1)愈来愈感兴趣。有关在这一范围内运行时床层特性的变化,在1.4节中将概括地予以阐述。在这些更极端的工况下,显然必须采取措施使离开床层被带走的物料不断地返回床内。

1.2 气体-流化床的特性范围

不同的气泡特性造成了气体-流化系统的各种特性范围^[3]。直径为 d_B 的单个气泡上升速度由下式给定:

$$U_B = k\sqrt{(gd_B/2)} \quad (2)$$

式中常数 k 与颗粒形状和粒径大小有关,一般情况下它的数值约为0.9。除 D 组物料的床外(见本节下文),该速度通常大于隙间的气体速度。泡链或泡云中的气泡上升得比孤立的气泡快,只有在大平均粒径(约1mm)的床中,上升速率会趋

* 自由空间即悬浮空间。——译者注

慢。当气泡经过床层上升时，它们受到周围连续相中气体的聚集作用，不过最主要的是由于聚结作用而长大。在此以后的过程中，较小的气泡受到超过它的较快上升气泡的作用而被卷入到较快上升气泡的尾流之中。不过对大颗粒床且气泡间横向聚结起主导作用的情况除外。有时也能观察到气泡的收缩，而对小于临界粒径的气泡这种倾向显得更加强烈。气泡可以自发地分开或与障碍物接触。一般的气泡特性受到向床引入气体的布风装置结构和浸没在床中表面的影响。在干扰流谱的某种状况发生前以及该系统还没有转变到一种新的流型时，气泡引起的颗粒对流将持续下去^[5]。当气泡上升时，它排挤掉在其行程中的一些颗粒并形成一条跟在它后面上升的漂流轨迹。除颗粒平均粒径大的床以外，一些颗粒被携带到气泡的尾流之中，并且物料连续不断地被尾流聚集，又在气泡经过床层上升时从尾流脱落。为了补充通过床层时由于上述过程上升被携带走的物料，床内其它区域的颗粒就要向下回流。

在高宽比大的深床和更高运行速度下，气泡会增大直至占据整个床层横截面。这些气泡带动它前面的颗粒一起团动，直至发生不稳定性以及颗粒崩塌回到床内，这就是所谓的气栓床。如上所述，此时供给的风量用来加速气团颗粒上升，因此通过床层的总压降就会超过单位面积的床重。而且经过床层的压力脉动将会增加^[6]（图1）。在宽筛分粒径分布情况下，当要求大部分颗粒处在流化状态工况下，往往可能损失掉大量的细粒。当然也有可能通过局部流化而使稠密流体中的较大颗粒流化。然而无论在哪种情况下，当风量减少时，将会出现分离，较大的颗粒会沉积在布风装置上。通常是要避免这种情况的，但是有时为使布风装置免受更高床温恶劣环境的影响，上述的沉积往往是有利的。