



“十三五”普通高等教育本科规划教材

循环流化床锅炉设备及系统

(第二版)

芮新红 朱皓强 合编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



“十三五”普通高等教育本科规划教材

循环流化床锅炉设备及系统 (第二版)

芮新红 朱皓强 合编
赵长遂 方梦祥 主审



本书由南京工程学院芮新红副教授和朱皓强教授合编。朱皓强编写第一章、第四章、第九章，芮新红编写第二、三、四、五、六、七章和复习思考题。全书由东南大学方梦祥教授和浙江大学赵长遂教授主审。赵长遂教授和方梦祥教授在百忙中认真仔细审阅书稿，并提出许多宝贵意见，使编者受益匪浅，在此深表感谢。

书中引用了大量的文献资料，在此向有关作者和单位深表谢意。

循环流化床燃烧技术的理论和技术仍在不断发展中，本书难免有不足之处，恳请读者给予批评指正。



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

2018年7月第1版第1次印刷
定价：32.00元

内 容 提 要

本书为“十三五”普通高等教育本科规划教材。

本书讲述循环流化床锅炉的设备和系统,内容包括:循环流化床燃烧技术的特点与循环流化床的基本理论;循环流化床锅炉的燃烧与传热;循环流化床锅炉的燃烧系统及设备、汽水系统和控制系统;循环流化床锅炉的设计原则和设计要点;循环流化床锅炉的典型炉型及其结构;循环流化床锅炉的有关运行技术;循环流化床锅炉气体污染物的排放与控制等。

本书既总结了循环流化床燃烧技术的基本特点、基本理论与基本实践,又反映了国内外循环流化床技术的发展状况,论述条理清晰,循序渐进,图文并茂,内容选取得当,工程实用性强。

本书主要作为能源与动力工程、能源环境工程及相关专业的教材,也可作为高职高专及函授教材,还可供从事相关专业的工程技术人员和管理人员学习与参考。

图书在版编目(CIP)数据

循环流化床锅炉设备及系统/芮新红,朱皓强编.—2版.—北京:中国电力出版社,2018.8

“十三五”普通高等教育本科规划教材

ISBN 978-7-5198-2329-0

I. ①循… II. ①芮…②朱… III. ①循环流化床锅炉—高等学校—教材 IV. ①TK229.6

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第185767号

出版发行:中国电力出版社

地 址:北京市东城区北京站西街19号(邮政编码100005)

网 址:<http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑:李 莉

责任校对:黄 蓓 闫秀英

装帧设计:王红柳

责任印制:吴 迪

印 刷:北京雁林吉兆印刷有限公司

版 次:2008年6月第一版 2018年8月第二版

印 次:2018年8月北京第九次印刷

开 本:787毫米×1092毫米 16开本

印 张:17.5

字 数:429千字

定 价:45.00元

版权专有 侵权必究

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

前 言

本书为满足应用型普通高等工程本科院校相关专业的教学需要而编写,第一版被评为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

循环流化床燃烧技术是最近二十多年来发展起来的新一代高效、低污染的清洁燃烧技术,也是目前商业化程度最好、应用前景最广的洁净煤燃烧技术。虽然经过长期深入的研究和试验,在循环流化床的气固两相流的流动特性、传热与燃烧机理、分离回送特性、污染物排放及燃料适应性、锅炉设备与系统的设计计算、调试运行与事故处理方法等方面,已经取得了大量的理论和经验成果,但是,作为一种新的燃烧方式,循环流化床燃烧技术基本理论的研究与工程实践的需要尚有差距,有关循环流化床锅炉设备与系统的设计计算方法还有待完善,运行和维护也缺乏统一的标准。有鉴于此,本书注意总结循环流化床燃烧技术的基本特点、基本理论与基本实践,并在教材内容和体系的安排上做了一些新的尝试。同时,在编写中力求突出理论与实际的结合,提高学生工程素质和培养学生工程实践能力,以努力满足应用型高等工程本科教学要求,为学生从事工程应用打下必需和坚实的理论基础,并能够适应科技发展和技术进步以及工程创新的要求。

全书共分九章。第一、二、三章讨论了循环流化床燃烧技术的特点、循环流化床的基本理论及循环流化床锅炉的燃烧与传热;第四、五章介绍了循环流化床锅炉的燃烧系统及设备以及汽水系统和控制系统;第六章探讨了循环流化床锅炉的设计原则和设计要点;第七章介绍了循环流化床锅炉的典型炉型及其结构;第八章概述了循环流化床锅炉的有关运行技术;第九章分析了循环流化床锅炉气体污染物的排放与控制问题。此次修订对第一版的有关章节进行了必要的补充和修改,增加了超临界参数循环流化床锅炉的相关内容。每章后增加了复习思考题,以方便读者学习巩固。

本书由南京工程学院芮新红副教授和朱皓强教授合编。朱皓强编写第一、二、八、九章,芮新红编写第三、四、五、六、七章和复习思考题。全书由东南大学博士生导师赵长遂和浙江大学方梦祥教授主审。赵长遂教授和方梦祥教授在百忙中认真仔细地审阅了书稿,并提出诸多宝贵意见,使编者受益匪浅,在此深表感谢。

书中引用了大量的文献资料,并且得到有关电厂的大力支持,由于篇幅所限,未能一一列出,在此向有关作者和单位谨致谢意。

循环流化床燃烧技术的理论与实践发展迅速,限于编者的水平,书中难免有不足与疏漏之处,恳请读者给予批评指正。

编 者

2018年7月于南京工程学院

目 录

前言	
第一章 概论	1
第一节 循环流化床锅炉的燃料.....	1
第二节 循环流化床锅炉的原理及组成.....	5
第三节 循环流化床锅炉的特点及主要型式.....	8
第四节 循环流化床锅炉的发展概况.....	11
复习思考题.....	17
第二章 循环流化床的基本理论	18
第一节 循环流化床中的基本概念.....	18
第二节 流态化及其典型形态.....	24
第三节 循环流化床的流体动力特性.....	29
第四节 临界流化速度及床层阻力特性.....	34
复习思考题.....	37
第三章 循环流化床锅炉的燃烧与传热	39
第一节 循环流化床锅炉燃烧的特点.....	39
第二节 循环流化床锅炉中煤颗粒的燃烧过程.....	42
第三节 循环流化床锅炉的燃烧区域与燃烧份额.....	46
第四节 影响循环流化床锅炉燃烧的因素.....	49
第五节 循环流化床锅炉的传热分析.....	52
第六节 循环流化床锅炉的传热研究与计算.....	57
复习思考题.....	66
第四章 循环流化床锅炉的燃烧系统及设备	68
第一节 燃烧系统概述.....	68
第二节 燃烧室.....	69
第三节 布风装置.....	72
第四节 物料循环系统.....	79
第五节 给料系统.....	95
第六节 烟风系统.....	102
第七节 除渣除灰系统.....	106
第八节 启动燃烧器.....	113
复习思考题.....	116
第五章 循环流化床锅炉的汽水系统和控制系统	117
第一节 循环流化床锅炉汽水系统的布置.....	117

第二节	循环流化床锅炉汽水系统的设备组成	121
第三节	循环流化床锅炉调节控制的基本要求	127
第四节	循环流化床锅炉的分散控制系统	129
	复习思考题	135
第六章	循环流化床锅炉设计概论	136
第一节	燃料燃烧计算	136
第二节	锅炉机组热平衡	140
第三节	循环流化床锅炉若干参数的设计选择	145
第四节	循环流化床锅炉主要设备的设计要点	153
第五节	典型循环流化床锅炉的设计特点	157
第六节	循环流化床锅炉的大型化	165
	复习思考题	168
第七章	循环流化床锅炉的典型炉型及其结构	169
第一节	75t/h 循环流化床锅炉	169
第二节	130t/h 水冷方形分离器循环流化床锅炉	174
第三节	220t/h 循环流化床锅炉	180
第四节	410t/h 高压循环流化床锅炉	188
第五节	440t/h 超高压再热循环流化床锅炉	194
第六节	670t/h 超高压再热循环流化床锅炉	204
第七节	1025t/h 亚临界参数再热循环流化床锅炉	209
第八节	超临界参数循环流化床锅炉	214
	复习思考题	225
第八章	循环流化床锅炉的运行	227
第一节	循环流化床锅炉的冷态试验	227
第二节	循环流化床锅炉的启动和停炉	231
第三节	循环流化床锅炉的运行调整	236
第四节	循环流化床锅炉运行的常见问题	242
	复习思考题	247
第九章	循环流化床锅炉气体污染物的排放与控制	249
第一节	环境质量与大气污染物排放标准	249
第二节	煤燃烧过程中 SO_2 的生成机理与影响因素	253
第三节	循环流化床锅炉脱硫	256
第四节	循环流化床锅炉内 NO_x 和 N_2O 的生成机理	260
第五节	循环流化床锅炉内 NO_x 和 N_2O 的排放控制	266
	复习思考题	270
	参考文献	272

第一章 概 论

能源与环境是人类赖以生存和发展的基础。化石能源（主要是煤和石油）的大规模生产和利用在推进社会经济发展的同时也对环境造成巨大影响：大气烟尘、酸雨、全球变暖（温室效应）和臭氧层破坏正在威胁着人类的生存环境。我国是世界上最大的煤炭生产国和消费国，煤炭产量占世界总产量的 36.5%，2015 年全国煤炭产量占世界总产量的 47%，全国煤炭消耗量达到 39.65 亿 t，占世界煤炭消耗量的一半，其中 80% 以上通过直接燃烧而被利用。由于煤粉燃烧技术的发展还不能很好地解决燃煤造成的日益严重的环境问题，自 20 世纪 60 年代开始，可以实现低温高效率燃烧各种燃料，特别是低质和高硫煤，并可在燃烧过程中控制 SO_x 及 NO_x 的排放的清洁煤燃烧技术——循环流化床燃烧技术得到迅速发展。循环流化床锅炉代表了新一代高效低污染燃煤设备的重要发展方向。

第一节 循环流化床锅炉的燃料

一、燃料的种类

燃料是指在燃烧过程中能够发出热量并能以各种方式加以利用的可燃物质。

燃料按其获得的途径分类，可分为天然燃料和人造燃料；按其物态又可分为固体、液体和气体三类。表 1-1 给出的是燃料的一般分类。

表 1-1 燃料的一般分类

燃料的物态	天然燃料	人造燃料
固体燃料	泥煤、褐煤、烟煤、无烟煤、油页岩、石煤、煤矸石、木柴	木炭、焦炭、粉煤、型煤、石油焦、洗煤厂煤泥、炭沥青、可燃固体废弃物
液体燃料	石油	汽油、煤油、柴油、重油、煤焦油、酒精
气体燃料	天然气、石油伴气、矿井气	高炉煤气、发生炉煤气、炼焦炉煤气、石油裂化气、地下气化煤气、沼气

天然燃料多指由远古植物遗体在地下温度、压力较高的环境中，经长时期的堆积、埋藏，受到地质变化作用（包括物理、化学、生物等作用），逐渐分解而最后形成的矿物燃料（又称化石燃料），如煤、石油、天然气等。天然燃料的组成主要是有机化合物以及部分无机化合物、水分和灰分。

人造燃料主要是指对天然燃料进行加工处理后得到的各种产品。从能源利用的角度来讲，可以通过燃烧来获得热能利用的各种可燃固体废弃物也可归入人造燃料之列。通常的可燃固体废弃物包括城市生活垃圾、农业废物、林业废物、洗煤泥、污泥、废轮胎以及各种有害固体废物（如含放射性的固体废物）等。

由于流化床燃烧对燃料的适应性极好，可以说几乎所有的天然固体燃料或人造固体燃料都可以作为循环流化床锅炉的燃料。在循环流化床锅炉的发展过程中，除极少量的循环流化

床废物焚烧炉外,循环流化床锅炉的燃料曾一度主要是劣质煤或高硫煤。目前,由于循环流化床锅炉大量用于电站发电,其主要燃料已不再局限于劣质煤或高硫煤。

二、煤的成分和性质

天然固体燃料主要是煤。根据碳化程度,煤可分为泥煤、褐煤、烟煤和无烟煤等四大类。随着碳化程度由浅到深,煤中的水分和挥发分不断减少,碳的含量不断增多。

1. 煤的元素组成

煤是由多种有机物质和无机物质混合组成的固体碳氢燃料。煤中有机物质主要由碳(C)、氢(H)、氧(O)、氮(N)四种元素构成,还有一些元素组成煤中的无机物质,主要有硫(S)、磷(P)以及锗(Ge)、镓(Ga)、铍(Be)等含量甚微的稀有元素等。

碳是煤中有机质的主导成分,也是最主要的可燃物质。一般来说,煤中碳的含量越多,煤的发热量也越高。碳完全燃烧时生成二氧化碳(CO_2),每千克碳可放出 32866kJ 热量;碳在不完全燃烧时生成一氧化碳(CO),此时每千克碳放出的热量为 9270kJ。由于碳的着火与燃烧都比较困难,含碳量高的无烟煤属于难燃煤种,但发热量高。

氢也是煤中重要的可燃物质。煤中的氢,一部分与氧化合成结晶水,称为化合氢;另一部分则与其他元素化合构成有机物,成为自由氢。每千克氢完全燃烧时放出的热量高达 120370kJ,是碳放热量的 3 倍多。煤中的氢含量一般随碳化程度的加深而减少。因此,无烟煤的发热量往往还不如某些优质的烟煤。

氧是煤中不可燃的元素,通常与煤中的氢和碳组成化合物(例如 H_2O 、 CO_2)。与氢含量一样,煤中的氧含量一般也随碳化程度的加深而减少。

煤中的氮主要来自成煤植物,含量较少。在煤燃烧时常呈游离状态逸出,不产生热量。氮在高温下与氧形成氮的氧化物(NO 、 NO_2 及 N_2O),会污染大气,为有害物质。

表 1-2 列出不同煤种中的碳、氢、氧、氮的干燥无灰基(dry and ash free)含量(干燥无灰基含量用下标“daf”表示)。

表 1-2

不同煤种中碳、氢、氧、氮的含量

%

元素 煤种	碳 (C_{daf})	氢 (H_{daf})	氧 (O_{daf})	氮 (N_{daf})
褐煤	60~75	6~5	30~10	3~1
烟煤	75~90	5~4	10~2	3~1
无烟煤	90~98	<4	2	3~1

硫在煤中的含量一般为 0.5%~3%,少数煤种含硫量可高达 5%~10%。一般含硫量 3% 以上的煤称为高硫煤。煤中的硫除元素硫外,主要是有机硫和无机硫两大部分。前者是指硫与 C、H、O 结合生成的复杂有机化合物;后者主要是黄铁矿硫(FeS_2)和硫酸盐硫(CaSO_4 等)。有机硫和黄铁矿硫及元素硫能参与燃烧,称为可燃硫;硫酸盐硫一般不能燃烧,在燃烧过程中转入到灰渣中,成为灰的一部分。可燃硫燃烧反应的放热量很低,仅为 9050kJ/kg。硫是煤中的有害元素。可燃硫燃烧后在烟气中形成 SO_2 和少量的 SO_3 , SO_2 和 SO_3 如与烟气中水分结合,将形成亚硫酸(H_2SO_3)和硫酸(H_2SO_4),腐蚀锅炉的低温受热面(如空气预热器)金属; SO_2 和 SO_3 排放到大气中将对大气环境造成污染,严重的会导致“酸雨”问题。

磷在煤中的含量一般不超过 1%。由于炼焦用煤中的磷可全部转入焦炭中,炼铁时焦炭中的磷又转入生铁中,这不仅增加熔剂和焦炭的消耗量,降低高炉生产率,还会使生铁变

脆,严重影响生铁的质量。从炼铁的角度来说,和硫一样,磷也是煤中的有害元素。

2. 常用的煤质指标

水分 (M)。水分是煤中的不可燃成分,其来源有三种,即外部水分、内部水分和化合水分。其中,化合水分又称做结晶水分,是煤中一部分氢、氧化合生成并与煤中化合物结合。在地下自然状态,褐煤、烟煤和无烟煤中的水分含量分别为 30%~60%、4%~15%和 2%~4%。含水分高的煤发热量低,不易着火、燃烧,而且在燃烧过程中水分汽化要吸热,使炉膛温度降低,锅炉效率下降。

灰分 (A)。灰分是指煤完全燃烧后其中矿物质的固体残余物。将煤样在 $815^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ 的高温炉内灰化到恒量,其残留物质的百分数即为灰分。灰分的来源,一是形成煤的植物本身的矿物质和成煤过程中进入的外来矿物杂质,二是开采运输过程中掺杂的灰、沙、土等矿物质。煤燃烧以后剩下的灰分的成分与原来煤中的灰分不完全相同,因为在燃烧过程中有脱水、分解、化合等反应,部分反应物还以气态形式逸散,剩下的才是灰分。灰分的主要成分除粘土 ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) 外,还包括少量的铁的氧化物 (FeO 、 Fe_2O_3 、 Fe_3O_4 等) 和微量的钙 (Ca)、镁 (Mg)、钠 (Na)、钾 (K)、钛 (Ti) 等金属的氧化物。通常,按原煤中的灰分含量 (A_{ar}) 将煤分为 5 级,即特低灰煤 ($A_{\text{ar}} \leq 10\%$)、低灰煤 ($A_{\text{ar}} > 10\% \sim 15\%$)、中灰煤 ($A_{\text{ar}} > 15\% \sim 25\%$)、富灰煤 ($A_{\text{ar}} > 25\% \sim 40\%$)、高灰煤 ($A_{\text{ar}} > 40\%$)。灰分是有害物质。灰分不仅使煤的发热量降低,而且影响煤的着火和燃烧。此外,灰分会污染锅炉受热面,影响传热,增加磨损。

挥发分 (V)。挥发分是煤中的有机质在一定温度和条件下,受热分解后产生的可燃性混合气体,主要成分包括各种碳氢化合物、 H_2 、 CO 等。我国的测定条件是煤样在专用坩埚中,在 $900^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ 的温度下隔绝空气加热 7min,此时,煤样的失重百分数与其水分之差即为挥发分。煤中挥发分的数量和质量对燃烧过程有很大影响。这是因为,煤在燃烧过程中,挥发分首先析出并着火燃烧。此外,挥发分析出多的煤(例如烟煤),其焦炭的质地较为疏松且多孔,氧或二氧化碳容易渗入焦炭内部,使得氧化反应或还原反应更为迅速,或者说更容易燃烧。一般来说,挥发分含量越高的煤种,越容易着火和稳定燃烧。根据我国动力用煤的分类,不同煤种的干燥无灰基挥发分含量范围为:无烟煤 $V_{\text{daf}} \leq 10\%$,贫煤 $V_{\text{daf}} > 10\% \sim 20\%$,褐煤 $V_{\text{daf}} > 37\%$,低挥发分烟煤 $V_{\text{daf}} > 10\% \sim 20\%$,中挥发分烟煤 $V_{\text{daf}} > 20\% \sim 28\%$ 、中高挥发分烟煤 $V_{\text{daf}} > 28\% \sim 37\%$,高挥发分烟煤 $V_{\text{daf}} > 37\%$ 。

发热量 (或称热值)。煤的发热量通常是指单位质量的煤在定压条件下完全燃烧后所释放的热量,单位为 kJ/kg 。若包含烟气中水蒸气凝结时放出的热量则称为高位发热量 Q_{gr} (定压高位发热量, gross constant pressure),反之则称为低位发热量 Q_{net} (定压低位发热量, net constant pressure)。我国的有关锅炉计算均以低位发热量为准。煤的发热量因煤种不同而不同,含水分、灰分多的煤发热量较低,通常称为劣质煤。实际上,如考虑煤利用过程中可能对环境造成的影响,含硫量高的煤也可归于劣质煤之列。褐煤的低位发热量 Q_{net} 为 $10000 \sim 17000 \text{kJ/kg}$,烟煤为 $20000 \sim 33000 \text{kJ/kg}$,无烟煤为 $26000 \sim 33000 \text{kJ/kg}$ 。

发热量是评价煤质最重要的指标之一,一般通过实验测定。煤的发热量也可用其元素分析数据按门捷列夫公式进行计算,即

$$Q_{\text{net,daf}} = 339C_{\text{daf}} + 1028H_{\text{daf}} - 109(O_{\text{daf}} - S_{\text{daf}}) \quad (1-1)$$

$$Q_{\text{net,d}} = 339C_{\text{d}} + 1028H_{\text{d}} - 109(O_{\text{d}} - S_{\text{d}}) \quad (1-2)$$

$$Q_{\text{net,ad}} = 339C_{\text{ad}} + 1028H_{\text{ad}} - 109(O_{\text{ad}} - S_{\text{ad}}) - 25M_{\text{ad}} \quad (1-3)$$

$$Q_{\text{net,ar}} = 339C_{\text{ar}} + 1028H_{\text{ar}} - 109(O_{\text{ar}} - S_{\text{ar}}) - 25M_{\text{ar}} \quad (1-4)$$

以上各式下标中的“d”、“ad”和“ar”分别表示干燥基(dry)、空气干燥基(air dry)和收到基(as received)。

式(1-1)~式(1-4)是国际上最广泛使用的计算公式,但对我国煤种误差较大,可达800~1200kJ/kg以上。因此,一般推荐使用式(1-5)计算煤的收到基高位发热量,即

$$Q_{\text{net,ar}} = 339(327)C_{\text{daf}} + 1298(1256)H_{\text{daf}} - 105O_{\text{daf}} - 21(A_{\text{d}} - 10) \quad (1-5)$$

式(1-5)对我国煤种较适合,误差一般不超过600kJ/kg。式中当 $C_{\text{daf}} > 95\%$ 或 $H_{\text{daf}} \leq 1.5\%$ 时, C_{daf} 前取括号内的系数;当 $C_{\text{daf}} < 77\%$ 时, H_{daf} 前取括号内系数;只有当 $A_{\text{d}} > 10\%$ 时,才计算灰分修正值。

煤的收到基低位发热量与收到基高位发热量之间的关系为

$$Q_{\text{net,ar}} = Q_{\text{gr,ar}} - 25(9H_{\text{ar}} + M_{\text{ar}}) \quad (1-6)$$

三、燃料燃烧对人体健康与环境的影响

在能源利用所排放到大气中的污染物中,99%的氮氧化物(NO_x)、99%的一氧化碳(CO)、91%的二氧化硫(SO_2)、78%的二氧化碳(CO_2)、60%的粉尘和43%的碳化氢(CH)是化石燃料燃烧过程中产生的,其中煤燃烧所产生的污染物又占很大的比例。燃煤是我国大气污染物的主要来源。

氮氧化物是化石燃料与空气在高温燃烧时产生的,主要是一氧化氮(NO)和少量的二氧化氮(NO_2)及氧化亚氮(N_2O)。通常将NO和 NO_2 统称为 NO_x 。 NO_x 对人体健康危害极大。例如,当浓度达到10~15ppm(ppm, parts per million, 百万分率)时,人体呼吸道就会受到刺激。一氧化碳(CO)气体无色、无臭、有毒。人体一旦吸入微量CO,就会发生头晕、头痛、恶心等症状,严重时会导致窒息、死亡。

煤燃烧时产生的多环芳香烃(PAHs)、二噁英(Dioxin, 指PCDDS、PCDFS)等虽然量微,但都是致癌物质。

煤燃烧后进入大气的粉尘总量包括灰粒子、微量金属和碳氢化合物、炭黑等,对人的健康威胁最大,是大气中最严重的污染物。粉尘浓度高会引起或促进慢性哮喘和其他呼吸道疾病的发生。

煤燃烧时排放的 SO_2 也是大气污染的元凶。 SO_2 在大气中经催化氧化等过程形成酸雨。(pH值 < 5.6 的雨水)。酸雨被称为“天堂的眼泪”、“空中的死神”,它不仅危及人体健康,还对生态环境和工农业生产造成极大危害。中国环境科学研究院、清华大学等单位的研究结果表明,由 SO_2 等导致的酸雨污染每年给我国造成的损失超过1100亿元。

此外,引起全球变暖(温室效应)的主要因素之一是 CO_2 排放增加。根据美国2007年5月发表的研究结果,2000~2004年间,全球 CO_2 排放量每年增加3.2%,大大超过1990~1999年年均1.1%的增长率。1980年全球 CO_2 排放量约为50亿t,至2004年已超过73亿t。“ CO_2 排放量的增加速度已超过联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)的预测,将进一步对全球气候产生巨大影响。”(国际能源机构的调查表明,美国 CO_2 排放量居世界首位,年人均 CO_2 排放量约20t,排放的 CO_2 占全球总量的23.7%。我国年人均 CO_2 排放量为2.51t,约占全球总量的13.6%)。同时, N_2O 也被认为是主要“温室效应”气体之一。 CO_2 和 N_2O 等“温室效应”气体的产生与化石燃料特别是煤的利用有很大关系。

第二节 循环流化床锅炉的原理及组成

一、流化床燃烧技术

循环流化床燃烧是在鼓泡流化床燃烧的基础上发展起来的，两者可统称为流化床燃烧。

正如所知，燃料的两种经典燃烧方式是固定床燃烧（又称层燃，包括固定炉排、链条炉排等）和悬浮燃烧（例如煤粉燃烧）。固定床燃烧是将燃料均匀布在炉排上，空气以较低的速度自下而上通过燃料层使其燃烧。悬浮燃烧则是先将燃料（如煤）磨成细粉，然后用空气通过燃烧器送入炉膛，在炉膛空间中作悬浮状燃烧。流化床燃烧是介于两者之间的一种燃烧方式。在流化床燃烧中，燃料被破碎到一定粒度，燃烧所需的空气从布置在炉膛底部的布风板下送入，燃料既不固定在炉排上燃烧，也不是在炉膛空间内随气流悬浮燃烧，而是在流化床内进行一种剧烈的、杂乱无章、类似于流体沸腾运动状态的燃烧。

如图 1-1 所示，当风速较低时，燃料层固定不动，表现层燃的特点。当风速增加到一定值（所谓最小流化速度或初始流化速度），布风板上的燃料颗粒将被气流“托起”，从而使整个燃料层具有类似流体沸腾的特性。此时，除了非常细而轻的颗粒床会均匀膨胀外，一般还会出现气体的鼓泡这样明显的不稳定性，形成鼓泡流化床燃烧（又称沸腾燃烧）。当风速继续增加，超过多数颗粒的终端速度时，大量未燃尽的燃料颗粒和灰颗粒将被气流带出流化床层和炉膛。为将这些燃料颗粒燃尽，

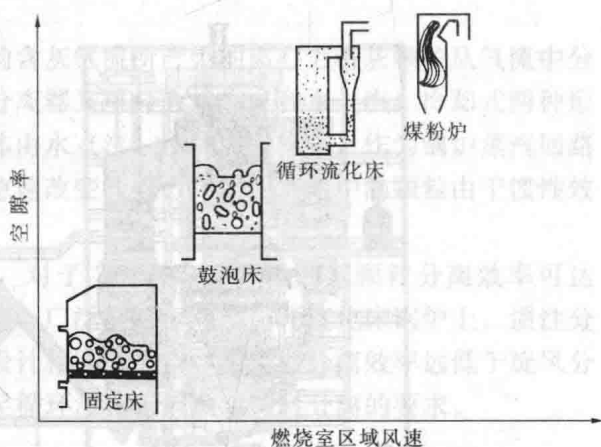


图 1-1 燃烧方式与风速的关系

可将它们从燃烧产物的气流中分离出来，送回并混入流化床继续燃烧，进而建立起大量灰颗粒的稳定循环，这就形成了循环流化床燃烧。如果空气流速继续增加，将有越来越多的燃料颗粒被气流带出，而气流与燃料颗粒之间的相对速度则越来越小，以致难以保持稳定的燃烧。当气流速度超过所有颗粒的终端速度时，就成了气力输送。但若燃料颗粒足够细，则可用空气通过专门的管道和燃烧装置送入炉膛使其燃烧，这就是燃料颗粒的悬浮燃烧。

图 1-2 示出的是鼓泡流化床燃烧系统。鼓泡流化床燃烧的主要缺点是：①由于细燃料颗粒在上部炉膛内未经燃尽即被带出，在燃烧宽筛分燃料时燃烧效率不高，脱硫反应的钙利用率低；②床内颗粒的水平方向湍动相对较慢，对入炉燃料的播散不利，影响床内燃料的均匀分布和燃烧效果，也迫使大功率燃烧系统的给煤点布置过多，不利于设备的大型化；③床内埋管受热面磨损速度过快。

为了解决上述问题，20 世纪 60 年代，国外在总结和研 究鼓泡流化床锅炉的基础上，开发、研制出循环流化床锅炉。如前所述，流化床燃烧的基本原理是燃料颗粒在流化状态下进行燃烧：一般粗颗粒在炉膛下部，细颗粒在炉膛上部。循环流化床锅炉与鼓泡流化床锅炉两者结构上最明显的区别在于循环流化床锅炉在炉膛上部的出口安装了循环灰分离器（多为旋风分离器），将烟气中的高温细固体颗粒分离收集起来送回炉膛。一次未燃尽而飞出炉膛的

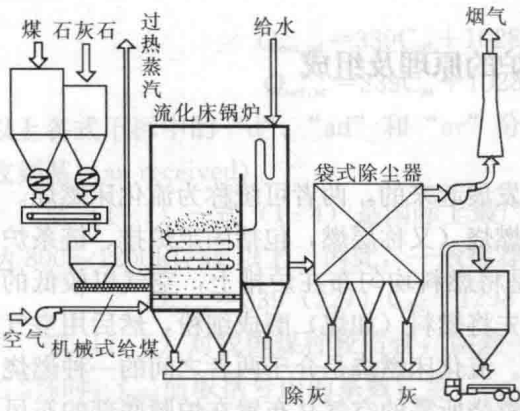


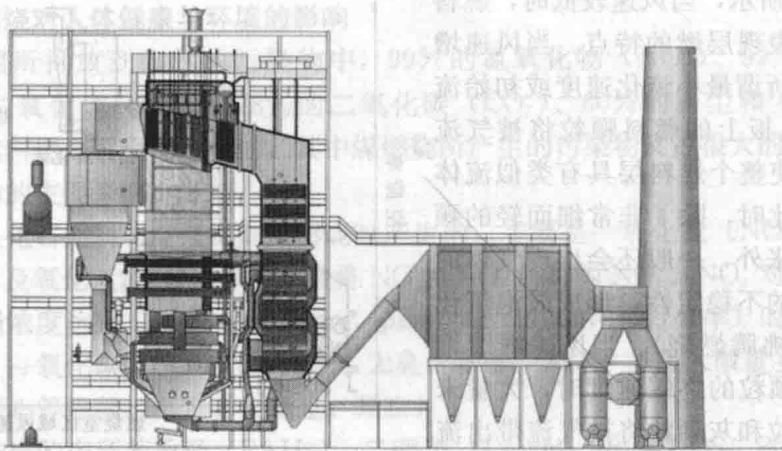
图 1-2 鼓泡流化床燃烧系统

颗粒可以再次循环燃烧，从而大大提高了燃尽率。同时，脱硫剂也可在炉内实现多次循环，脱硫效率得到提高。循环流化床锅炉的“循环”一词因高温物料在炉内的循环而得名。

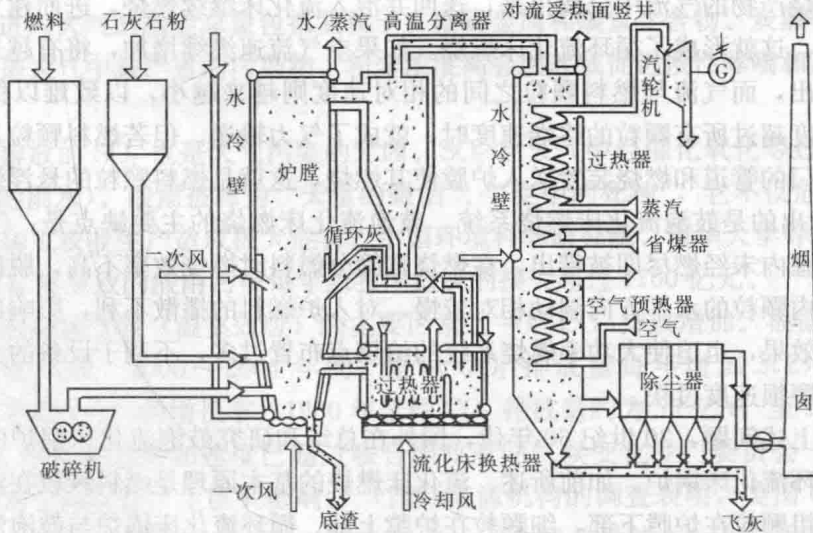
通常，将鼓泡流化床锅炉（又称沸腾炉）称为第一代流化床锅炉，循环流化床锅炉称为第二代流化床锅炉。

二、循环流化床锅炉系统及组成

循环流化床锅炉系统通常由流化床燃烧室（炉膛）、循环灰分离器、飞灰回送装置、尾部受热面和辅助设备等组成。一些循环流化床锅炉还有外置流化床换热器。图 1-3 为带有外置流化床换热器的循环流化床锅炉系统示意。



(a)



(b)

图 1-3 循环流化床锅炉系统

(a) 结构示意图；(b) 系统示意

1. 燃烧室（炉膛）

流化床燃烧室（炉膛）由膜式水冷壁构成，底部为布风板，以二次风入口为界分为两个区：二次风入口以下的锥形段为大颗粒还原气氛燃烧区，二次风以上为小颗粒氧化气氛燃烧区。燃料的燃烧过程、脱硫过程等主要在炉膛内进行。由于炉膛内布置有受热面，大约50%燃料释放热量的传递过程在炉膛内完成。顺便指出，流化床燃烧室也可以在加压状态下工作（一般将燃烧空气加压至0.6~1.6MPa），此时称为增压循环流化床（PCFB）燃烧。

2. 循环灰分离器

循环灰分离器是循环流化床锅炉系统的关键部件之一。循环灰分离器的形式决定了燃烧系统和锅炉整体布置的形式和紧凑性，其性能对燃烧室的空气动力特性、传热特性、飞灰循环、燃烧效率、锅炉出力和蒸汽参数、锅炉的负荷调节范围和启动所需时间、散热损失以及脱硫剂的脱硫效率和利用率，乃至循环流化床锅炉系统的维修费用等均有重要影响。

循环灰分离器的种类很多，新的形式还在不断出现，但总体上可分为高温旋风分离器和惯性分离器两大类。

高温旋风分离器的工作原理是利用旋转的含灰气流所产生的离心力将灰颗粒从气流中分离出来。根据壳体结构材料不同，高温旋风分离器又可分为绝热式和水（汽）冷却式两种形式，前者内部设有防磨层和绝热层，后者壳体由水（汽）冷膜式壁构成，作为锅炉蒸汽回路的一部分。惯性分离器的工作原理则是通过急速改变气流方向，使气流中的颗粒由于惯性效应而与气流轨迹脱离。

高温旋风分离器结构简单，分离效率高，对于30~50 μm 粒径的细颗粒分离效率可达99%以上，但阻力较大，燃烧系统布置欠紧凑，广泛应用于大型循环流化床锅炉上。惯性分离器比旋风分离器结构简单，易与锅炉整体设计相匹配，阻力小，但分离效率远低于旋风分离器，一般还需要辅以其他分离手段才能满足循环流化床锅炉对物料分离的要求。

3. 飞灰回送装置

飞灰回送装置主要指送灰器（又称回料阀、返料阀、回料器），是循环流化床锅炉系统的重要部件，它的正常运行对燃烧过程的可控性以及锅炉的负荷调节性能起决定性作用。

飞灰回送装置的功能是将循环灰分离器收集下来的飞灰送回流化床循环燃烧。由于分离器内的压力低于燃烧室内的压力，循环灰是从低压区回送到高压区，飞灰回送装置还必须起到“止回阀”的作用。如果高压区气体反窜进入分离器，将破坏分离工况，降低分离效率，影响灰粒循环以致循环流化床锅炉不能正常运行。

由于循环灰回路温度高，工作条件苛刻，循环流化床锅炉系统的飞灰回送装置一般多采用非机械式的。设计中采用的飞灰回送装置有两种类型。一种是自动调节型送灰器，如流化密封送灰器（又称U形阀）；另一种是阀型送灰器，如L形阀、V形阀、J形阀等。自动调节型送灰器能随锅炉负荷的变化自动改变送灰量，而无需调整送灰风量；阀型送灰器要改变送灰量则必须调整送灰风量，也就是说，随锅炉负荷的变化必须调整送灰风量。

4. 外置流化床换热器（外置冷灰床）

外置流化床换热器是布置在循环流化床灰循环回路上的一种热交换器，又称外置冷灰床，简称外置床。外置床的功能是将部分或全部循环灰（取决于锅炉的运行工况和蒸汽参数）载有的一部分热量传递给一组或数组受热面，同时兼有循环灰回送功能。外置床通常由一个灰分配室和一个或若干个布置有浸埋受热面管束的床室组成。这些管束按灰的温度不同

可以是过热器、再热器或蒸发受热面。

外置流化床换热器采用低速鼓泡流化床运行方式, 传热系数高。由于循环灰平均粒径较小 (一般 $100\sim 150\mu\text{m}$), 流化速度 $0.3\sim 0.5\text{m/s}$ 即可保证正常流化, 灰粒对受热面管束的磨损很小, 管束的使用寿命较长。

采用外置流化床换热器的主要优点是: ①解决了大型循环流化床锅炉燃烧室四周表面积相对不足, 难以布置所需受热面的矛盾; ②具有调节燃烧室温度和过热器/再热器蒸汽温度的功能; ③扩大了循环流化床锅炉的负荷调节范围和对燃料的适应性。

第三节 循环流化床锅炉的特点及主要型式

一、循环流化床锅炉的特点

1. 循环流化床锅炉的工作条件

循环流化床锅炉工作的基本特点是低温的动力控制燃烧, 高速度、高浓度、高通量的固体物料流态化循环过程以及高强度的热量、质量和动量传递过程。

循环流化床锅炉的工作条件可归纳为表 1-3。

表 1-3 循环流化床锅炉的工作条件

项 目	数 值	项 目	数 值
床层温度 ($^{\circ}\text{C}$)	850~950	床层压降 (kPa)	11~12
流化速度 (m/s)	4~6	炉内颗粒浓度 (kg/m^3)	150~600 (炉膛底部)
床料粒度 (μm)	100~700		10~40 (炉膛上部)
床料密度 (kg/m^3)	1800~2600	Ca/S 摩尔比	1.5~4
燃料粒度 (mm)	0~13	壁面传热系数 [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$]	100~250
脱硫剂粒度 (mm)	1 左右		

2. 循环流化床锅炉的优点

如前所述, 循环流化床锅炉采用飞灰循环燃烧, 克服了鼓泡流化床燃烧效率不高的缺点。人们普遍认为, 流化床燃烧将是电站锅炉、工业锅炉和工业窑炉的一种很有前途和极具竞争力的燃烧方式。循环流化床锅炉具有一般常规锅炉所不具备的优点。主要体现在以下几点:

(1) 燃料适应性好。由于飞灰再循环量的大小可改变床内的吸热份额, 循环流化床锅炉对燃料的适应性特别好。只要燃料的热值大于把燃料本身和燃烧所需的空气加热到稳定燃烧温度所需的热量, 这种燃料就能在循环流化床锅炉内稳定燃烧, 不需使用辅助燃料助燃, 就能达到高的燃烧效率 (此时床内不布置受热面)。循环流化床锅炉几乎可以烧各种煤 (如泥煤、褐煤、烟煤、贫煤、无烟煤、洗煤厂煤泥), 以及洗矸、煤矸石、焦炭、油页岩、垃圾等, 且燃烧效率很高, 这对于充分利用劣质燃料具有重大意义。

(2) 燃料预处理系统简单。由于循环流化床锅炉的燃料粒度一般为 $0\sim 13\text{mm}$, 与煤粉锅炉相比, 燃料的制备破碎系统大为简化。此外, 循环流化床锅炉能直接燃用高水分煤 (水分可达到 30% 以上), 当燃用高水分燃料时也不需要专门的处理系统。

(3) 燃烧效率高。常规工业锅炉和流化床锅炉的燃烧效率为 $85\%\sim 95\%$ 。循环流化床锅炉由于采用飞灰再循环燃烧, 锅炉燃烧效率可达 $95\%\sim 99\%$ 。

(4) 负荷调节范围宽。煤粉锅炉负荷调节范围通常在 70%~110%，而循环流化床锅炉负荷调节范围比煤粉锅炉宽得多，一般为 30%~110%，负荷调节速率可达 (5%~10%) B-MCR/min (maximum continuous rating, 简称为 MCR, 即锅炉最大连续蒸发量)。有的循环流化床锅炉即使在 20% 负荷情况下，也能保持燃烧稳定，甚至可以压火备用。因此，循环流化床锅炉特别适用于电网的调峰机组或热负荷变化大的热电联产机组和供热工业锅炉。

(5) 燃烧污染物排放量低。向循环流化床锅炉内加入脱硫剂 (如石灰石、白云石)，可以脱去燃料燃烧过程中生成的二氧化硫 (SO_2)。根据燃料中的含硫量确定加入的脱硫剂量，当钙硫比为 2~2.5 时，循环流化床锅炉的脱硫效率可达 90%，而鼓泡流化床锅炉要达到同样的脱硫效率，钙硫比需在 3~5 之间。因此，循环流化床锅炉还可以大大提高钙的利用率。由于循环流化床锅炉采用分级燃烧，燃烧温度一般控制在 850~950℃ 范围之内，氮氧化物 (热反应型 NO_x) 的生成量显著减少，其排放浓度为 100~200ppm，而常规流化床燃烧和煤粉燃烧的 NO_x 排放浓度分别为 300~400ppm 和 500~600ppm。循环流化床锅炉的其他污染物如一氧化碳 (CO)、氯化氢 (HCl)、氟化氢 (HF) 等的排放也很低。

(6) 燃烧热强度大。由于飞灰再循环燃烧，循环流化床锅炉克服了常规流化床锅炉床内释热份额大，悬浮段释热份额小的缺点，燃烧热强度比常规锅炉高得多：截面热负荷可达 3.5~4.5MW/m²，接近或高于煤粉锅炉，是鼓泡流化床锅炉的 2~4 倍，链条炉的 2~6 倍；炉膛容积热负荷为 1.5~2MW/m³，是煤粉锅炉的 8~10 倍。燃烧热强度大的好处是可以使设备紧凑，减低金属消耗。

(7) 炉内传热能力强。循环流化床锅炉炉内传热主要是上升的烟气和流动的物料与受热面的对流换热和辐射换热。由表 1-3 可见，炉膛内气固两相混合物对水冷壁的传热系数比煤粉锅炉炉膛的辐射传热系数大得多。因此，与煤粉锅炉相比，可大幅度节省受热面金属耗量。

(8) 易于实现灰渣综合利用。循环流化床燃烧过程属于低温燃烧，同时炉内良好的燃尽条件使得锅炉的灰渣含碳量低，属于低温烧透，灰渣不会软化和黏结，活性较好。另外，炉内加入石灰石后，灰渣成分也有变化，含有一定的 CaSO_4 和未反应的 CaO 。循环流化床锅炉灰渣可用作制造水泥的掺和料或做建筑材料，易于实现灰渣综合利用。同时，低温烧透还有利于灰渣中稀有金属的提取。

(9) 床内可不布置埋管受热面。循环流化床锅炉由于飞灰再循环和床料平均粒径较小，床内上下部燃料燃烧释热较均匀，床内不布置埋管受热面而采用膜式水冷壁和其他附加受热面，因而不存在鼓泡流化床锅炉的埋管受热面易磨损的问题。另外，由于床内无埋管受热面，启动、停炉以及处理结焦的时间短，即使长时间压火之后也可直接启动。

表 1-4 给出的是循环流化床锅炉与煤粉锅炉技术经济及性能的综合比较。

表 1-4 循环流化床锅炉与煤粉锅炉技术经济及性能的综合比较

项 目	循环流化床锅炉	煤 粉 锅 炉
燃料适应性	好	不好
低负荷稳燃能力	好	不好
可靠性	若选型得当，与煤粉锅炉相当	好
氮氧化物排放控制	基本无投资运行费用	投资和运行费用较高
脱硫投资	初投资低，为煤粉锅炉的 1/4	较大

续表

项 目	循环流化床锅炉	煤 粉 锅 炉
不带脱硫锅炉岛投资	锅炉较贵, 无制粉系统, 比煤粉锅炉高 7%	锅炉较便宜, 有制粉系统
不带脱硫运行费用	可烧差煤, 价格较低	要烧好煤, 价格较高
不带脱硫维护成本	若选型得当, 费用较低	较低
不带脱硫自用电率	烧好煤时与煤粉锅炉相当, 烧差煤时较高	要烧好煤, 较低
带脱硫锅炉岛投资	比煤粉锅炉约低 12%	较高
带脱硫自用电率	烧好煤比煤粉锅炉低, 烧差煤与相当	较高
脱硫运行费用	较低, 为煤粉锅炉的 10%	较高
灰渣综合利用	可以	可以

3. 循环流化床锅炉的缺点

虽然循环流化床锅炉具备常规锅炉和鼓泡流化床锅炉所没有的诸多优点, 但是也存在如下主要的缺点:

(1) 烟风系统阻力较高, 风机耗电大。循环流化床锅炉布风板的存在和飞灰再循环燃烧, 使得送风系统的阻力远大于煤粉锅炉的送风阻力, 而烟气系统中又增加了循环灰分离器的阻力。

(2) 锅炉受热面部件的磨损比较严重。由于循环流化床锅炉内的高颗粒浓度和高风速, 锅炉部件的磨损是比较严重的。虽然采取了许多防磨措施, 但是实际运行中循环流化床锅炉受热面的磨损速度仍比常规锅炉大得多。

(3) 实现自动化的难度较大。因为循环流化床锅炉风烟系统和灰渣系统远比常规锅炉复杂, 不同炉型的燃烧调整方式也有所不同, 控制点较多, 所以采用计算机自动控制要比常规锅炉难得多。

此外, 应该指出的是, 为使设计和运行达到优化的目的, 循环流化床锅炉的许多问题尚有待于解决。例如, 需要研制效率高、阻力低、体积小、磨损轻和制造运行方便的循环灰分离器, 床内固体颗粒的浓度和运行风速的确定、炉内受热面布置和温度的控制、低污染燃烧和炉内传热机理等都需要从理论和实验两方面做深入研究。

二、循环流化床锅炉的主要型式

由于循环流化床锅炉还处于发展阶段, 结构型式繁多。目前, 世界上较有代表性的循环流化床锅炉炉型为: 德国 Lurgi 型、芬兰 Pyroflow 型、美国 FW 型、德国 Circofluid 型和内循环 (IR) 型, 分别见图 1-4。

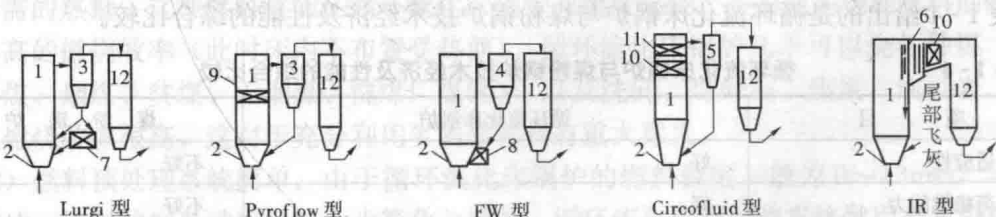


图 1-4 循环流化床锅炉的主要型式

- 1—燃烧室 (炉膛); 2—布风装置; 3—高温绝热旋风分离器; 4—水 (汽) 冷却式高温旋风分离器; 5—中温旋风分离器; 6—炉内循环灰分离装置 (U 型槽分离器或百叶窗式分离器); 7—外置流化床换热器; 8—整体式再循环换热器 (INTREX); 9—屏式过热器; 10—过热器; 11—高温省煤器; 12—尾部烟道

现将上述五种炉型的特点分别简要介绍如下：

(1) Lurgi 型。炉膛布置膜式水冷壁受热面，采用工作温度与炉膛燃烧温度（870℃左右）相近的高温旋风分离器。其主要技术特点是在循环灰回路上设置有外置流化床换热器（见图 4-32）。此种炉型最早由德国鲁奇（Lurgi）公司推出。

(2) Pyroflow 型。采用绝热高温旋风分离器，膜式水冷壁炉膛内布置管屏或分隔墙受热面。由于无外置换热器，固体物料循环回路中的吸热靠膜式水冷壁和分隔墙受热面来保证。这种型式的循环流化床锅炉由芬兰奥斯龙（Ahlstrom）公司生产，并被定名为 Pyroflow 循环流化床锅炉。

(3) FW 型。其特点是采用汽冷式高温旋风分离器和整体式再循环换热器 INTREX（Integrated Recycle Heat Exchanger）。INTREX 实际上是一个利用非机械方式使固体转向的外置鼓泡流化床。这种型式的循环流化床锅炉因由美国福斯特·惠勒（Foster Wheeler, FW）公司制造而得名。

(4) Circofluid 型。炉膛运行气速相对较低。炉膛上部布置过热器和高温省煤器，炉膛烟气出口温度约为 450℃，因而采用体积较小，耐温及防磨要求较低的中温旋风分离器。此种炉型由德国巴布科克（Babcock）公司研制成功。

(5) 内循环（IR）型。在炉膛出口处布置一级 U 形分离元件，分离下来的烟灰沿炉膛后墙向下流动，形成内循环（internal recirculation, IR），故称内循环（IR）型。这种型式的循环流化床锅炉结构简单，外形与常规煤粉锅炉相似，比较适合于现有煤粉锅炉的改造。图 1-5 是美国巴布科克·威尔科克斯公司（B&W, Babcock & Wilcox, 简称巴威公司）的一种内循环型循环流化床锅炉。

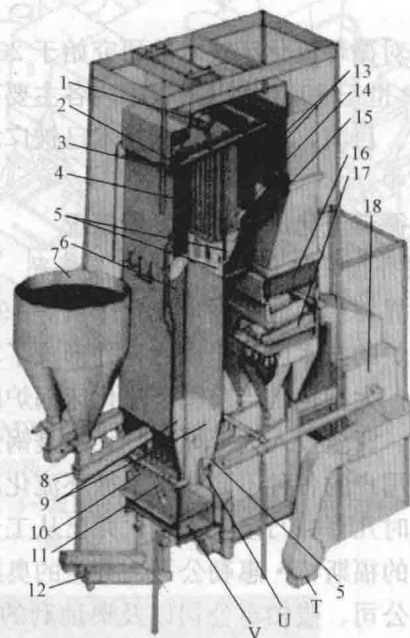


图 1-5 巴威（B&W）公司的内循环型循环流化床锅炉布置

- 1—汽包；2—炉内槽形分离器；3、5、9—水冷耐火层；4—蒸发器；
- 6—分隔；7—煤仓；8—重力给煤机；10—二次风喷嘴；11—给煤槽；12—冷渣器；13—过热器；14—外槽形分离器；15—飞灰斗；
- 16—省煤器；17—多管旋风分离器；18—管式空气预热器

第四节 循环流化床锅炉的发展概况

一、循环流化床的发展概况

流化床的概念最早出现在化工领域。20 世纪 20 年代初，德国的温克勒发明了世界上第一台流化床并成功运行。他将燃烧产生的烟气引入一装有焦炭颗粒的炉室底部，然后观察到了固体颗粒在上升气流的作用下整个颗粒系统类似沸腾液体的现象。此后，美国、德国、法国、芬兰和英国等开始研究开发及应用流化床技术。尤其是在石油催化裂化过程中的应用，