

工业锅炉 大气污染控制 技术与应用

TECHNOLOGY AND APPLICATION
OF AIR POLLUTION CONTROL FOR
INDUSTRIAL BOILERS

岳 涛 魏志勇 左朋莱 张晓曦 等 / 主编

中国环境出版社

工业锅炉大气污染控制技术与应用

岳 涛 魏志勇 左朋莱 张晓曦 等 主编

中国环境出版社·北京

图书在版编目 (CIP) 数据

工业锅炉大气污染控制技术与应用/岳涛等主编. —北京:
中国环境出版社, 2016.10
ISBN 978-7-5111-2921-5

I. ①工… II. ①岳… III. ①工业锅炉—空气污染
控制 IV. ①X701

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 239423 号

出 版 人 王新程
责任编辑 殷玉婷
责任校对 尹 芳
封面设计 宋 瑞

出版发行 中国环境出版社
(100062 北京市东城区广渠门内大街 16 号)
网 址: <http://www.cesp.com.cn>
电子邮箱: bjgl@cesp.com.cn
联系电话: 010-67112765 (编辑管理部)
发行热线: 010-67125803, 010-67113405 (传真)

印 刷 北京中科印刷有限公司
经 销 各地新华书店
版 次 2016 年 11 月第 1 版
印 次 2016 年 11 月第 1 次印刷
开 本 787×1092 1/16
印 张 23.75
字 数 450 千字
定 价 50.00 元

【版权所有。未经许可, 请勿翻印、转载, 违者必究。】
如有缺页、破损、倒装等印装质量问题, 请寄回本社更换

前 言

工业锅炉作为热能动力设备,在我国社会现代化进程中发挥着举足轻重的作用,它不仅牵动着经济的发展,更是关系到社会民生的保障。我国是世界上工业锅炉保有量最大的国家,截至 2015 年年底,全国各类工业锅炉保有量约 57 万台,占锅炉总台数的 98%。工业锅炉中绝大多数为燃煤锅炉,且具有量大面广、单台容量小的特点。由于这些锅炉大多分布在城市及其周边地区,且基本上是燃用未经洗选加工的原煤,采用低烟卤排放,是影响城市空气环境质量的主要污染源之一。燃煤工业锅炉的治理对于城市大气环境质量的改善及我国主要污染物减排目标的实现具有非常重要的现实意义。

随着社会对环境保护问题的持续关注,工业锅炉的大气污染治理工作也日益得到重视,“大气十条”的发布要求全面整治燃煤小锅炉,加快推进集中供热、“煤改气”“煤改电”等工程建设,这给工业锅炉的污染治理打了一剂强心针,并伴随一系列配套政策和措施的发布实施,工业锅炉大气污染物控制进入了新阶段。

本书从工业锅炉的基本概念入手,介绍了与工业锅炉相关的产品标准、大气污染物排放标准及环保节能政策法规;分析了工业锅炉特别是燃煤工业锅炉的污染物排放特征及检测方法,在此基础上着重介绍了工业锅炉除尘、脱硫、脱硝技术和应用案例,并简单介绍了汞污染防治相关内容,以期为环境监督管理、环保工程设计、锅炉日常运行维护、高等院校教学等提供参考。

本书是根据作者多年来对锅炉大气污染控制研究工作和工程经验归纳整理编写的,作者主持、参与了大量的科研项目,包括基础研究、环境管理类研究等,主要研

究课题或技术成果有国家重点研发计划课题《基于实测的锅炉大气污染物排放规律研究与排放标准实施评估》(2016YFC0208103),“十二五”科技支撑计划课题《大气污染控制重大环保装备运行效果评价技术标准研究与应用示范》(2012BAB18B03),“863”计划课题《大中型燃煤工业锅炉碱性废物法烟气脱硫技术及设备产业化》,环保公益性行业科研专项《燃煤工业锅炉、窑炉重金属污染物排放标准限值及控制策略研究》(201009048)和《工业锅炉及钢铁等涉汞行业大气汞防治技术与管理政策研究》(201309018),环境管理类项目《燃煤二氧化硫排放污染防治技术政策(修订)》《脱硫石膏污染防治技术政策》《“十二五”氮氧化物和二氧化硫减排环境保护标准体系构建》《“十二五”工业锅炉主要大气污染物控制技术路线研究》《生物质颗粒燃料工业锅炉大气污染物排放水平研究》《工业锅炉氮氧化物等多种污染物协同控制技术方

案研究》《工业锅炉大气污染综合防治指导意见》《工业锅炉烟尘及二氧化硫污染防治技术路线研究》和《工业锅炉及炉窑湿法烟气脱硫工程技术规范(HJ 462—2009)》等,为我国锅炉大气污染环境管理工作提供技术支撑。此外在本书编写过程中,还参考并引用了大量文献资料,咨询了部分行业和企业有关的专家。

本书由岳涛、魏志勇、左朋莱、张晓曦等主编。全书共8个章节,其中前言、第1章由岳涛、魏志勇编写;第2章由左朋莱、岳涛编写;第3章由王晨龙、岳涛编写;第4章由王堃、左朋莱编写;第5章由张晓曦编写;第6章由高佳佳、张晓曦编写;第7章由佟莉编写;岳涛对全书进行了统筹并终审。

目 录

第 1 章 概 述.....	1
1.1 工业锅炉的概念、分类及型号编制规则	1
1.2 工业锅炉工作过程及系统组成	9
1.3 燃料及其燃烧特性	15
1.4 我国工业锅炉概况	34
参考文献	40
第 2 章 工业锅炉环保相关标准及政策法规	42
2.1 工业锅炉产品设计与运行中环保相关标准	42
2.2 工业锅炉污染物排放相关标准政策	46
2.3 近年工业锅炉的节能减排政策	54
参考文献	56
第 3 章 工业锅炉大气污染物排放特征及检测方法	57
3.1 工业锅炉大气污染物的生成机理和排放特征	57
3.2 工业锅炉大气污染物检测方法	67
参考文献	144
第 4 章 工业锅炉除尘技术及应用	146
4.1 国内外除尘技术应用情况	146
4.2 机械式除尘器	148
4.3 湿式除尘器	153
4.4 过滤式除尘器	158
4.5 静电除尘器	175
4.6 电袋复合除尘器	185

4.7 湿式电除尘器	190
4.8 低低温电除尘技术	201
4.9 除尘设施运行存在的问题	208
4.10 烟气除尘技术综合评价	210
参考文献	217
第5章 工业锅炉二氧化硫控制技术及应用	219
5.1 国内外脱硫技术应用情况	219
5.2 石灰石—石膏法	221
5.3 钠钙双碱法	227
5.4 氧化镁法	233
5.5 氨法	240
5.6 喷雾干燥半干法	247
5.7 循环流化床(半)干法	251
5.8 脱硫除尘一体化控制技术	255
5.9 “以废治废”脱硫工艺	259
5.10 脱硫设施运行存在的问题	273
5.11 烟气脱硫技术综合评价	274
参考文献	284
第6章 工业锅炉氮氧化物控制技术及应用	286
6.1 国内外氮氧化物控制技术应用情况	286
6.2 低氮燃烧技术	287
6.3 选择性催化还原法	303
6.4 选择性非催化还原法	317
6.5 吸收法	321
6.6 电子束照射法	324
6.7 脉冲电晕等离子法	325
6.8 臭氧氧化吸收法	327
6.9 湿法脱硫脱硝一体化技术应用案例	329
6.10 脱硝设施运行存在的问题	334

6.11 烟气脱硝技术综合评价	336
参考文献	348
第 7 章 工业锅炉汞污染防治及应用	349
7.1 影响汞脱除效率的主要因素	349
7.2 燃烧前脱汞技术	351
7.3 燃烧中脱汞技术	354
7.4 烟气脱汞技术	354
参考文献	372

第 1 章

概 述

工业锅炉是重要的热动力设备，广泛应用于工厂动力、建筑采暖等方面，需求量较大。在相当长的时间内，我国实行“以煤为主”的能源政策，工业锅炉的生产、使用一直以燃煤锅炉为主。但随着我国节能减排、可再生能源利用等政策的推行，国家推出了一系列的节能减排政策和措施，鼓励企业研发高效率、低能耗、低排放的产品，倡导节能减排全民意识，工业锅炉的产品结构、燃烧方式也发生了不同程度的变化，流化床锅炉、生物质锅炉、余热锅炉等得到了较快发展。本章从工业锅炉的基本概念入手，全面系统地介绍了与工业锅炉相关的知识。

1.1 工业锅炉的概念、分类及型号编制规则

1.1.1 工业锅炉的概念

锅炉是一种把化学能转变为热能的能量转换装置，煤炭、石油、天然气等化石燃料在锅炉中通过燃烧将蕴含的化学能释放出来，转变为烟气的热能；烟气再通过各种形式将热能传递给水，使其获得热量或者沸腾。高温水和蒸汽可以直接应用于生产生活中，也可以继续转变为电能等更便捷实用的能量来使用。

国务院颁发的《特种设备安全监察条例》（2003 年 3 月 11 日中华人民共和国国务院令 第 373 号公布，并根据 2009 年 1 月 24 日《国务院关于修改〈特种设备安全监察条例〉的决定》修订）中，锅炉的定义是指“利用各种燃料、电或者其他能源，将所盛装的液体加热到一定的参数，并对外输出热能的设备，其范围规定为容积大于或者等于 30 L

的承压蒸汽锅炉；出口水压大于或者等于 0.1 MPa（表压），且额定功率大于或者等于 0.1 MW 的承压热水锅炉和有机热载体锅炉”。锅炉按照用途分类可以简单划分为发电用的电站锅炉和直接供给工农业生产、居民取暖和驱动机械的工业锅炉两类。

为了与发电用大型锅炉相区别，我国通常将以燃煤、燃油和燃气为燃料的单台出力 65 t/h 及以下蒸汽锅炉、各种容量的热水锅炉及有机热载体锅炉；各种容量的层燃炉、抛煤机炉称为工业锅炉。但是随着越来越多的热电联产锅炉投入使用，工业锅炉与发电锅炉之间的界限也在逐渐淡化。

1.1.2 工业锅炉的分类

工业锅炉包括工业生产和生活采暖所需的所有锅炉，大多数为低压、低温、小容量锅炉，火床燃烧居多，热效率较低。

（1）按锅炉工质分类

锅炉的工质是指在热力循环中可使热与功相互转换的可压缩流体，包括蒸汽、水、风以及有机载热体等。可分为蒸汽锅炉、热水锅炉、汽水两用锅炉、热风炉和有机热载体锅炉等。

2004 年发布的 GB/T 3166 和 GB/T 1921 规定了工业蒸汽和热水锅炉的额定参数系列，见表 1.1 和表 1.2。

表 1.1 工业蒸汽锅炉额定参数系列

额定蒸发量/ (t/h)	额定蒸汽压力（表压力）/MPa											
	0.1	0.4	1.7	1.0	1.25		1.6		2.5			
	额定蒸汽温度/℃											
	饱和	饱和	饱和	饱和	饱和	250	250	饱和	350	饱和	350	400
0.1	Δ	Δ										
0.2	Δ	Δ	Δ									
0.3	Δ	Δ	Δ									
0.5	Δ	Δ	Δ	Δ								
0.7		Δ	Δ	Δ								
1.0		Δ	Δ	Δ								
1.5			Δ	Δ								
2			Δ	Δ	Δ			Δ				
3			Δ	Δ	Δ			Δ				
4			Δ	Δ	Δ			Δ		Δ		

额定蒸发量/ (t/h)	额定蒸汽压力（表压力）/MPa											
	0.1	0.4	1.7	1.0	1.25			1.6		2.5		
	额定蒸汽温度/℃											
	饱和	饱和	饱和	饱和	饱和	250	250	饱和	350	饱和	350	400
6				Δ	Δ	Δ	Δ	Δ	Δ	Δ		
8				Δ	Δ	Δ	Δ	Δ	Δ	Δ		
10				Δ	Δ	Δ	Δ	Δ	Δ	Δ	Δ	Δ
12					Δ	Δ	Δ	Δ	Δ	Δ	Δ	Δ
15					Δ	Δ	Δ	Δ	Δ	Δ	Δ	Δ
20					Δ	Δ	Δ	Δ	Δ	Δ	Δ	Δ
25					Δ		Δ	Δ	Δ	Δ	Δ	Δ
35					Δ		Δ	Δ	Δ	Δ	Δ	Δ
65											Δ	Δ

表 1.2 热水锅炉额定参数系列

额定功率/MW	额定出水压力 (表压力) /MPa											
	0.4	0.7	1.0	1.25	0.7	1.0	1.25	1.0	1.25	1.25	1.6	2.5
	额定出水温度/进水温度/ (℃/℃)											
	95/70				115/70			130/70		15/90		180/110
0.05	△											
0.1	△											
0.2	△											
0.35	△	△										
0.5	△	△										
0.7	△	△	△	△	△							
1.05	△	△	△	△	△							
1.4	△	△	△	△	△							
2.1	△	△	△	△	△							
2.8	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△		
4.2		△	△	△	△	△	△	△	△	△		
5.6		△	△	△	△	△	△	△	△	△		
7.0		△	△	△	△	△	△	△	△	△		
8.4				△		△	△	△	△	△		
10.5				△		△	△	△	△	△		
14.0				△		△	△	△	△	△	△	
17.5						△	△	△	△	△	△	
29.0						△	△	△	△	△	△	△
46.0						△	△	△	△	△	△	△
58.0						△	△	△	△	△	△	△
116.0									△	△	△	△
174.0											△	△

(2) 按本体结构的型式分类

锅炉按本体结构的型式可分为火管锅炉（也称烟管锅炉、锅壳锅炉）、水管锅炉和水火管锅炉 3 种。

① 火管锅炉的外形为一筒体，属内燃式锅炉，具有结构紧凑、整体性好，对给水品质要求不高，安装和运行都很方便等优点；但因其本体结构尺寸受到限制，一般只能制造成低参数、小容量的锅炉。目前在燃油、燃气锅炉中得到广泛应用。火管锅炉按其布置方式可分为卧式和立式两种。前者的锅壳纵向中心线平行于地平面，后者的锅壳纵向中心线垂直于地平面。

② 水管锅炉本体由较小直径的锅筒和管子组成，受力条件好，且受热面和炉膛布置非常灵活，传热性能好，适用于大容量和高参数锅炉；但对水质、安装、运行、维修、管理要求都很高。

火管锅炉和水管锅炉的细分见表 1.3。

表 1.3 火管锅炉与水管锅炉的分类

火管锅炉	立式锅炉	立式横水管火管锅炉
		立式横火管锅炉
		立式双回程火管锅炉
		立式弯水管火管锅炉
	卧式锅炉	卧式单炉胆（双炉胆）锅炉
		卧式内燃三回程锅炉
		卧式内燃四回程锅炉
		卧式内燃回火管锅炉
水管锅炉	横水管锅炉	立式横直水管锅炉
		分联箱直水管锅炉
	竖水管锅炉	双锅筒纵置式 D 型弯水管锅炉
		双锅筒横置式锅炉
		三锅筒弯水管锅炉
		单锅筒人字形水管锅炉

③ 水火管锅炉是一种由水管和火管组合而成的混合型锅炉。它具有水管和火管锅炉的双重优点，水管构成外置炉膛，燃烧室体积较火管锅炉增加，锅炉容量相应增加，一般制造成快装（整装或组装）锅炉出厂。广泛应用于燃煤锅炉，目前在中国工业锅炉中，此型锅炉的数量约占一半。

此外还有适用于特殊要求的工业锅炉,即特种锅炉,其主要炉型有余热锅炉、废料锅炉、间接加热锅炉、特种工质锅炉等。

(3) 按燃料种类分类

锅炉燃烧需要燃料进行能量供给,根据燃料的种类不同可将锅炉分为燃煤锅炉、燃油锅炉、燃气锅炉、生物质锅炉和电加热锅炉等。

① 燃煤锅炉是以煤炭为燃料的锅炉,按照燃烧方式又可分为层燃锅炉、室燃锅炉和沸腾锅炉(循环流化床锅炉)。

② 燃油、燃气锅炉是以燃料油(以下简称燃油)或可燃气(以下简称燃气)作为燃料的锅炉。既可以燃油又可以燃气的锅炉称为燃油燃气工业锅炉,亦称双燃料锅炉,俗称油气炉。

③ 生物质锅炉是以生物质作为燃料的锅炉。按生物质燃料的形式可分为生物质散料燃料锅炉和生物质成型燃料锅炉。生物质散料燃料密度小,结构松散,迎风面积大,容易被吹起,悬浮燃烧比例大;生物质成型燃料属于低碳燃料,燃烧时间长,易于掌控,操作方便,应用前景广阔。本书主要介绍生物质成型燃料锅炉。

④ 电加热锅炉是采用金属管状电加热器给水加热,使电能直接转化为热能(产生热水或蒸汽),不需要采用燃烧的方式将化学能转化为热能,也就不需要供应燃烧所需的空气和燃料,不会排放有害气体及灰渣,完全符合环保要求,但运行成本很高,适用于小规模用能场所使用。

(4) 按锅炉容量分类

蒸发量小于等于 10 t/h 的称为小型锅炉,蒸发量大于 65 t/h 的称为大型锅炉,蒸发量介于两者之间的称为中型锅炉。

(5) 按工质循环形式分类

按锅炉水循环形式可以分为自然循环锅炉和强制循环锅炉、控制循环锅炉和直流锅炉。

(6) 按出口蒸汽压力分类

对于蒸汽锅炉,根据出口工质的压力可分为常压锅炉、低压锅炉(表压 ≤ 2.45 MPa)、中压锅炉(表压 2.94~4.90 MPa)、高压锅炉(表压 7.84~10.8 MPa)、超高压锅炉(表压 11.8~14.7 MPa)。

1.1.3 工业锅炉型号编制规则

(1) 工业锅炉产品型号组成

工业锅炉（电加热锅炉除外）产品型号由三部分组成，各部分之间用短横线相连（图 1.1）。



图 1.1 工业锅炉产品型号组成示意图

各部分表示内容如下：

① 型号的第一部分表示锅炉本体型式和燃烧设备型式或燃烧方式及锅炉容量。共分三段，第一段用两个大写字母代表锅炉本体型式（表 1.4）；第二段用一个大写字母代表燃烧设备型式或燃烧方式（表 1.5）；第三段用阿拉伯数字表示蒸汽锅炉额定蒸发量为若干 t/h 或热水锅炉额定热功率为若干 MW。各段连续书写。

表 1.4 锅炉本体型式代号

锅炉类型	锅炉本体型式	代号
锅壳锅炉	立式水管	LS
	立式火管	LH
	立式无管	LW
	卧式外燃	WW
	卧式内燃	WN
水管锅炉	单锅筒立式	DL
	单锅筒纵置式	DZ
	单锅筒横置式	DH
	双锅筒纵置式	SZ
	双锅筒横置式	SH
	强制循环式	QX

注：水火管混合式锅炉，以锅炉主要受热面型式采用锅壳锅炉或水管锅炉本体型式代号，但在锅炉名称中应写明“水火管”字样。

表 1.5 燃烧设备型式或燃烧方式代号

燃烧设备	代号
固定炉排	G
固定双层炉排	C
链条炉排	L
往复炉排	W
滚动炉排	D
下饲炉排	A
抛煤机	P
鼓泡流化床燃烧	F
循环流化床燃烧	X
室燃炉	S

注：抽板顶升采用下饲炉排代号。

② 型号的第二部分表示介质参数。对蒸汽锅炉分两段，中间以斜线相连，第一段用阿拉伯数字表示额定蒸汽压力为若干 MPa；第二段用阿拉伯数字表示过热蒸汽温度为若干℃，蒸汽温度为饱和温度时，型号的第二部分无斜线和第二段。对热水锅炉分三段，中间也以斜线相连，第一段用阿拉伯数字表示额定出水压力为若干 MPa；第二段和第三段分别用阿拉伯数字表示额定出水温度和额定进水温度为若干℃。

③ 型号的第三部分表示燃料种类。用大写汉语拼音字母代表燃料品种，同时用罗马数字代表同一燃料品种的不同类别与其并列（表 1.6）。如同时使用几种燃料，主要燃料放在前面，中间以顿号隔开。

表 1.6 燃料种类代号

燃料种类	代号
Ⅱ类无烟煤	WⅡ
Ⅲ类无烟煤	WⅢ
Ⅰ类烟煤	AⅠ
Ⅱ类烟煤	AⅡ
Ⅲ类烟煤	AⅢ
褐煤	H
贫煤	P
型煤	X
水煤浆	J
木柴	M

燃料种类	代号
稻壳	D
甘蔗渣	G
油	Y
气	Q

锅炉本体型式、燃烧设备型式或燃烧方式、燃料种类超出上表规定时,企业可参照上述规定自行编制产品型号。

(2) 电加热锅炉产品型号组成

电加热锅炉产品型号由两部分组成,各部分之间用短横线相连(图 1.2)。各部分表示内容如下:

① 型号的第一部分表示锅炉本体型式和电加热锅炉代号及锅炉容量。共分三段,第一段用一个大写汉语拼音字母表示锅炉本体型式,锅炉本体型式分为卧式和立式两种,用 W 代表卧式,用 L 代表立式;第二段用汉语拼音字母 DR 表示电加热锅炉代号;第三段用阿拉伯数字表示蒸汽锅炉的额定蒸发量为若干 t/h 或热水锅炉的额定热功率为若干 MW。各段连续书写。

② 型号的第二部分表示锅炉的介质参数。蒸汽锅炉用阿拉伯数字表示额定蒸汽压力为若干 MPa;热水锅炉分三段,各段之间以斜线相连,第一段用阿拉伯数字表示额定出水压力为若干 MPa;第二段和第三段分别用阿拉伯数字表示出水温度和进水温度为若干℃。

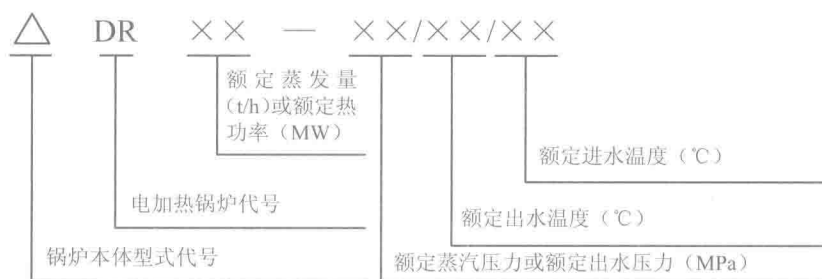


图 1.2 电加热锅炉产品型号组成示意

(3) 汽水两用工业锅炉产品型号组成

工业锅炉如为蒸汽和热水两用锅炉,以锅炉主要功能来编制产品型号,但在锅炉名称上应写明“汽水两用”字样。

(4) 锅炉产品型号示例

① LSG0.5-0.4-AIII

表示立式水管固定炉排, 额定蒸发量为 0.5 t/h, 额定蒸汽压力为 0.4 MPa, 蒸汽温度为饱和温度, 燃用Ⅲ类烟煤的蒸汽锅炉。

② DZL4-1.25-W II

表示单锅筒纵置式链条炉排, 额定蒸发量为 4 t/h, 额定蒸汽压力为 1.25 MPa, 蒸汽温度为饱和温度, 燃用Ⅱ类无烟煤的蒸汽锅炉。

③ SZS10-1.6/350-Y、Q

表示双锅筒纵置式室燃, 额定蒸发量为 10 t/h, 额定蒸汽压力为 1.6 MPa, 过热蒸汽温度为 350℃, 燃油、燃气两用, 以燃油为主的蒸汽锅炉。

④ SHX20-2.5/400-H

表示双锅筒横置式循环流化床燃烧, 额定蒸发量为 20 t/h, 额定蒸汽压力为 2.5 MPa, 过热蒸汽温度为 400℃, 燃用褐煤的蒸汽锅炉。

⑤ QXW2.8-1.25/95/70-A II

表示强制循环往复炉排, 额定热功率为 2.8 MW, 额定出水压力为 1.25 MPa, 额定出水温度为 95℃, 额定进水温度为 70℃, 燃用Ⅱ类烟煤的热水锅炉。

⑥ LDR0.5-0.4

表示立式电加热锅炉, 额定蒸发量为 0.5 t/h, 额定工作压力为 0.4 MPa 的蒸汽锅炉。

⑦ WDR0.7-1.0/95/70

表示卧式电加热锅炉, 额定热功率为 0.7 MW, 额定出水压力为 1.0 MPa, 额定出水温度为 95℃, 额定进水温度为 70℃的热水锅炉。

1.2 工业锅炉工作过程及系统组成

1.2.1 工业锅炉的工作过程

通过工业锅炉进行能量转换的应用, 一般由多个工作过程组成, 这里以燃煤锅炉的工作过程为例可简单地分为炉内过程和锅内过程, 通常把燃料、烟气侧进行的燃烧、放热、排渣、气体流动等过程总称为炉内过程。把水、汽侧进行的流动、吸热、汽化、汽水分离以及一系列热化学过程总称为锅内过程。工业锅炉的工作过程如图 1.3 所示。