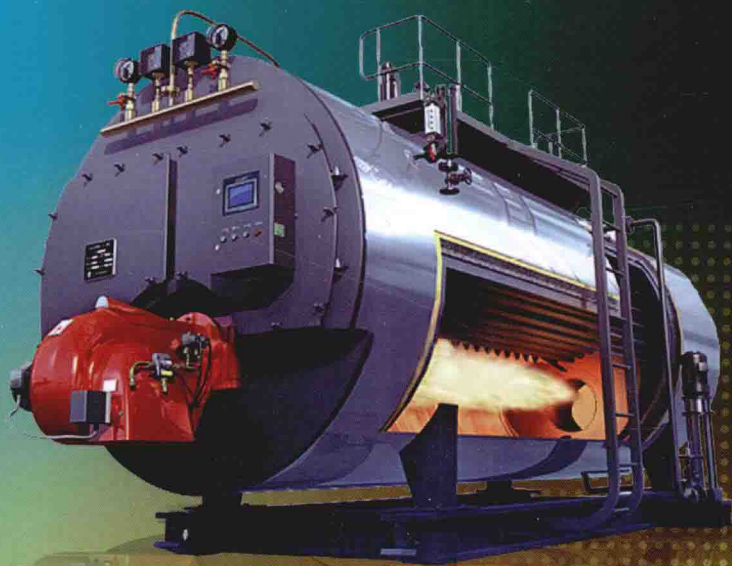


Technologies of
Energy Efficiency Test for Boiler

锅炉能效测试技术

中国特种设备安全与节能促进会 组织编写

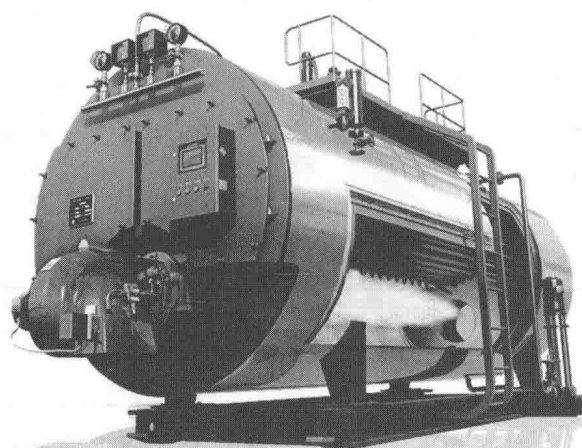


化学工业出版社

Technologies of
Energy Efficiency Test for Boiler

锅炉能效测试技术

中国特种设备安全与节能促进会 组织编写



化学工业出版社

· 北京 ·

本书按照《锅炉节能技术监督管理规程》(TSG G 0002—2010)、《工业锅炉能效测试与评价规则》(TSG G 0003—2010)、《工业锅炉热工性能试验规程》(GB/T 10180—2003)、《工业锅炉能效测试作业人员考核大纲》要求编写。

本书以能效测试工作程序为主线,介绍了锅炉基础知识、工业锅炉能效测试方法与要求、工业锅炉能效主要参数测试方法及注意事项、主要测量仪表基本性能及适用范围、对测试数据的处理及计算,并提供了锅炉能效测试的典型案例。

本书既可作为锅炉能效测试人员测试技术的培训教材,也可作为从事工业锅炉节能管理与技术人员的参考用书,还可供高等院校相关专业师生参考阅读。

图书在版编目(CIP)数据

锅炉能效测试技术/中国特种设备安全与
节能促进会组织编写. —北京:化学工业出版社,
2015.1

ISBN 978-7-122-22363-0

I. ①锅… II. ①中… III. ①工业锅炉-传热效率-
测试-技术培训-教材 IV. ①TK229

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 272519 号

责任编辑:高 震

装帧设计:韩 飞

责任校对:吴 静

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 刷:北京永鑫印刷有限责任公司

装 订:三河市宇新装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张 14 字数 230 千字 2015 年 6 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:48.00 元

版权所有 违者必究

京化广临字 2015—5 号

本书编委会

主 编：宋继红

副 主 编：王晓雷 冷浩

编写人员：（按姓氏笔画排序）

于在海	王长明	王 林	王晓雷	白丽丽
刘 明	刘 晨	许永平	孙 涛	李伟光
杨 麟	冷 浩	宋吉民	宋继红	陈志刚
陈征宇	喻孟全			



前言

我国在用工业锅炉 60 余万台,是世界上工业锅炉保有量最大的国家。我国工业锅炉以燃煤锅炉为主,是仅次于电站锅炉的第二大煤炭消耗装置,在国内部分重点城市污染排放比例已经超过电站锅炉,工业锅炉节能减排形势严峻,任务迫切。

2008 年以来,国家质检总局依据《节约能源法》和《特种设备安全监察条例》规定,实施了锅炉设计文件节能审查、锅炉定型产品能效测试和在用工业锅炉定期能效测试制度,并将安全监察和节能监管有机结合,初步建立了涵盖设计、制造、安装、改造、维修、使用、检验全过程的节能监管体系。截至目前,国家质检总局已公布了 130 余家锅炉能效测试机构,培训考核锅炉能效作业人员 800 余人,基本覆盖全国各省区。按照《锅炉节能技术监督管理规程》和《工业锅炉能效测试与评价规则》要求,锅炉能效测试机构已完成锅炉定型产品能效测试 4000 余台,在用锅炉能效测试 20000 余台,对锅炉产品市场准入及在用锅炉能效诊断发挥了重要作用。

本书编写过程中,按照《锅炉节能技术监督管理规程》(TSG G 0002—2010)、《工业锅炉能效测试与评价规则》(TSG G 0003—2010)、《工业锅炉热工性能试验规程》(GB/T 10180—2003)以及《工业锅炉能效测试作业人员考核大纲》要求,引用了相关技术标准和专业技术资料的相关数据,结合我国工业锅炉运行现状,总结国内工业锅炉能效测试技术人员的经验,充分体现技术的针对性、实用性和时效性,能够最大限度满足能效测试工作的需要。

本书以能效测试工作程序为主线,介绍了锅炉基础知识、工业锅炉能效测试方法与要求、工业锅炉能效测试主要参数测试方法及注意事项、主要测量仪表基本性能及适用范围、对测试数据的处理及计算,并提供了锅炉能效测试的典型案例。本书既可作为锅炉能效测试人员的培训教材,也可作为大专院校相关专业参考书。

本书中介绍的测试方法、参数的测量、仪器的使用、数据的处理、实际测试案例均通过能效测试机构的认可和试验验证。

本书由中国特种设备安全与节能促进会负责组织,中国特种设备检测研究院、辽宁省安全科学研究院、沈阳特种设备检测研究院、长春特种设备检测研究院、天津市特种设备监督检验技术研究院、江苏省特种设备安全监督检验研究院、浙江省特种设备检验研究院、河南省锅炉压力容器安全检测研究院、广东省特种设备检测研究院顺德分院、上海工业锅炉研究所参与编写。

在此对参与本书编写工作和提供大量实践经验的人员表示衷心感谢。

由于水平所限,书中恐有不足之处,敬请批评指正。

编者

2015年3月

目 录

第一章 基础知识	1
第一节 锅炉设备及其系统	2
第二节 燃料特性及其燃烧	9
第三节 锅炉工质	25
第四节 传热学基础	28
第二章 测试方法和要求	35
第一节 概述	36
第二节 锅炉定型产品热效率测试	36
第三节 锅炉运行工况热效率详细测试	43
第四节 锅炉运行工况热效率简单测试	44
第三章 参数的测量	47
第一节 燃料的计量和取样	48
第二节 灰渣的计量和取样	55
第三节 流量的测量	58
第四节 压力的测量	60
第五节 温度的测量	61
第六节 烟气成分的测量	64
第七节 饱和蒸汽湿度和过热蒸汽含盐量的测量	66
第八节 电量的测量	71
第四章 测量仪表	73
第一节 温度测量仪表	74
第二节 压力测量仪表	80
第三节 流量测量仪表	83
第四节 烟气分析仪表	95
第五节 蒸汽品质分析仪表	98

第六节 动平衡烟尘采样仪	101
第五章 数据计算与分析	103
第一节 锅炉热平衡	104
第二节 锅炉正平衡热效率计算	106
第三节 锅炉反平衡热效率计算	110
第四节 锅炉运行工况热效率简单测试计算	116
第五节 数据折算和修正	119
第六节 锅炉热效率计算数据与说明	124
第六章 案例	141
第一节 测点布置实例	142
第二节 测试大纲实例	146
第三节 测试报告	155
附录A 高耗能特种设备节能监督管理办法	184
附录B 《工业锅炉热工性能试验规程》(GB/T 10180—2003) 中测试要求的说明	188
附录C 饱和水和饱和蒸汽的热力性质	201
附录D 计量单位换算	206
附录E 燃料特性	207
附录F 导热油技术指标	212
附录G 烟气、灰和空气的平均定压比热容	213
附录H 网格法	213

第一章 基础知识

• 第一节 •

锅炉设备及其系统

一、锅炉的定义和分类

1. 锅炉定义

锅炉，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，并通过对外输出介质的形式提供热能的设备，其范围规定为设计正常水位容积大于或者等于 30L，且额定蒸汽压力大于或者等于 0.1MPa（表压）的承压蒸汽锅炉；出口水压大于或者等于 0.1MPa（表压），且额定功率大于或者等于 0.1MW 的承压热水锅炉；额定功率大于或者等于 0.1MW 的有机热载体锅炉。

锅炉广泛应用于国民经济的各个领域，如电力、机械、冶金、化工、纺织、造纸、食品加工和民用采暖等行业。电站锅炉是火力发电厂的三大主机之一，正向大容量、高参数方向发展。工业锅炉应用于各行各业，正向高效率、低排放方向发展。

2. 锅炉分类

锅炉的分类有多种方法。

按用途可分为电站锅炉、工业锅炉。电站锅炉用于发电；工业锅炉用于工业生产用热、动力供应及采暖和热水供应。

按输出介质可分为蒸汽锅炉、热水锅炉、有机热载体锅炉。蒸汽锅炉用于产生蒸汽，又称蒸汽发生器；热水锅炉用于产生热水；有机热载体锅炉是以液态有机物质作为热载体工质的锅炉。

按结构可分为锅壳锅炉、水管锅炉。锅壳锅炉是蒸发受热面主要布置在锅壳内，燃料燃烧后产生的高温烟气在管内而汽水在管外流动的锅炉；水管锅炉是烟气在受热面管子外部流动，工质在管子内部流动的锅炉。

按工质循环的方式可分为自然循环锅炉、强制循环锅炉、直流锅炉和复合循环锅炉。自然循环锅炉是依靠下降管中的水和炉内上升管中汽水混合物之间

的密度差和高度产生的压差而推动水循环的锅筒锅炉；强制循环锅炉是主要依靠锅水循环泵的压头推动水循环的锅筒锅炉，又称辅助循环锅炉；直流锅炉是受给水泵压头的作用，工质按顺序依次通过加热段、蒸发段和过热段等各级受热面而产生额定参数蒸汽的锅炉；复合循环锅炉是在低负荷时，依靠锅水循环泵使蒸发受热面出口的部分或全部水，经过再循环管路回到炉膛水冷壁受热面中进行再循环，而在一定高负荷下自动切换成直流方式运行的锅炉。按再循环负荷的大小，复合循环锅炉又可分为全负荷复合循环锅炉和部分负荷复合循环锅炉。

按出口工质压力 p （表压，下同， p 是指锅炉额定工作压力，对蒸汽锅炉表示额定蒸汽压力，对热水锅炉表示额定出水压力，对有机热载体锅炉表示额定出口压力）。可分为以下几种。

(1) A 级锅炉是指压力大于等于 3.8MPa 的锅炉。

- ① 超临界锅炉， $p \geq 22.1\text{MPa}$ ；
- ② 亚临界锅炉， $16.7\text{MPa} \leq p < 22.1\text{MPa}$ ；
- ③ 超高压锅炉， $13.7\text{MPa} \leq p < 16.7\text{MPa}$ ；
- ④ 高压锅炉， $9.8\text{MPa} \leq p < 13.7\text{MPa}$ ；
- ⑤ 次高压锅炉， $5.3\text{MPa} \leq p < 9.8\text{MPa}$ ；
- ⑥ 中压锅炉， $3.8\text{MPa} \leq p < 5.3\text{MPa}$ 。

(2) B 级锅炉。

- ① 蒸汽锅炉， $0.8\text{MPa} < p < 3.8\text{MPa}$ ；
- ② 热水锅炉， $p < 3.8\text{MPa}$ ，且 $t \geq 120^\circ\text{C}$ （ t 为额定出水温度，下同）；
- ③ 气相有机热载体锅炉， $Q > 0.7\text{MW}$ （ Q 为额定热功率，下同）；液相有机热载体锅炉， $Q > 4.2\text{MW}$ 。

(3) C 级锅炉。

- ① 蒸汽锅炉， $p \leq 0.8\text{MPa}$ ，且 $V > 50\text{L}$ （ V 为设计正常水位水容积，下同）；
- ② 热水锅炉， $p < 3.8\text{MPa}$ ，且 $t < 120^\circ\text{C}$ ；
- ③ 气相有机热载体锅炉， $0.1\text{MW} < Q \leq 0.7\text{MW}$ ；液相有机热载体锅炉， $0.1\text{MW} < Q \leq 4.2\text{MW}$ 。

(4) D 级锅炉。

- ① 蒸汽锅炉， $p \leq 0.8\text{MPa}$ ，且 $30\text{L} \leq V \leq 50\text{L}$ ；
- ② 汽水两用锅炉（其他汽水两用锅炉按照出口蒸汽参数和额定蒸发量分属以上各级锅炉）， $p \leq 0.04\text{MPa}$ ，且 $D \leq 0.5\text{t/h}$ （ D 为额定蒸发量，下同）；
- ③ 仅用自来水加压的热水锅炉，且 $t \leq 95^\circ\text{C}$ ；
- ④ 气相或者液相有机热载体锅炉， $Q \leq 0.1\text{MW}$ 。

按燃烧方式可分为层燃锅炉、室燃锅炉、流化床燃烧锅炉。层燃锅是采用层式燃烧技术的锅炉，又称火床炉，有固定火床炉和移动火床炉两类；室燃锅炉是采用悬浮燃烧技术的锅炉；流化床锅炉是采用流化燃烧技术的锅炉，也称沸腾床锅炉。

按常用燃料可分为燃煤锅炉、燃油锅炉、燃气锅炉、电加热锅炉、余热锅炉。

按炉膛烟气压力可分为负压锅炉、微正压锅炉、增压锅炉。负压锅炉是用引风机压头克服烟、风道阻力，因而使风道、炉膛及烟道均处于负压状态下运行的锅炉；微正压锅炉是指只配置送风机而不配置引风机，因而炉膛中烟气压力高于大气环境压力的锅炉，一般用于燃油和燃气的锅炉，炉膛设计压力一般在 5kPa 以下；增压锅炉是指在某些燃气-蒸汽联合循环中，同时作为燃气轮机燃烧室以产生高压烟气的锅炉，烟气压力一般大于 0.3MPa。

按排渣方式可分为固态排渣锅炉、液态排渣锅炉。固态排渣锅炉是指燃料燃烧后产生的炉渣呈固态从炉膛排出的锅炉；液态排渣锅炉是指燃料燃烧后产生的炉渣在熔渣室的高温下熔化成液态从炉膛排出的锅炉。

按锅炉出厂形式可分为整装锅炉、组装锅炉、散装锅炉。整装锅炉是指按照运输条件所允许的范围，在制造厂完成总装整台发运的锅炉；组装锅炉是指在制造厂内将整台锅炉分成几个装配齐全的大件，运到工地后可将诸大件方便地组合而成的锅炉；散装锅炉是指在制造厂内将锅炉的零部件制造完成，运到工地后再完成安装的锅炉。

二、 锅炉的参数和型号

1. 锅炉参数

锅炉的功能是产生一定参数和品质的蒸汽、热水或有机热载体。锅炉参数指额定出力、额定压力、额定温度等。

(1) 额定出力 蒸汽锅炉的额定出力又称为额定蒸发量，是指在额定蒸汽参数、额定给水温度、使用设计燃料时所规定的蒸发量，用符号 D 来表示，单位是 t/h（吨/时）。

热水锅炉的额定出力又称为额定热功率或额定容量，指在额定回水温度、额定出水温度、额定回水压力、额定出水压力、额定循环水量和使用设计燃料时所达到的供热量。用热功率表示，符号是 Q ，单位是 MW（兆瓦）。 $0.7\text{MW}(60 \times 10^4 \text{kcal/h}, 1\text{kcal}=4.187\text{kJ})$ 约相当于 1t/h 蒸汽的热量。

有机热载体锅炉额定容量与热水锅炉的额定容量意义相同。

(2) 额定压力 额定压力是指锅炉。在额定参数下长期连续运行时应予保证的出口压力用符号 p 表示，单位是 MPa（兆帕）。

(3) 额定温度 额定温度是指蒸汽锅炉在额定出力、额定压力和额定给水温度下长期连续运行应予保证的出口蒸汽温度。用符号 t 表示，单位是℃（摄氏度）。蒸汽锅炉出口温度有饱和温度、过热温度。

热水锅炉额定出水温度是指热水锅炉在额定回水温度、额定回水压力、额定出水压力和额定循环水量长期连续运行时应予保证的出口热水温度。

有机热载体锅炉额定出口油温与热水锅炉的额定出口水温定义类似。

我国以《工业蒸汽锅炉参数系列》(GB/T 1921—2004) 和《热水锅炉参数系统》(GB/T 3166—2004) 规定了工业锅炉产品设计参数。

2. 工业锅炉型号表示方法

为了规范锅炉的表示方法，我国制定了《工业锅炉产品型号编制方法》(JB/T 1626—2002) 和《电站锅炉产品型号编制方法》(JB/T 1617—1999)。

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），各部分表示内容如下。

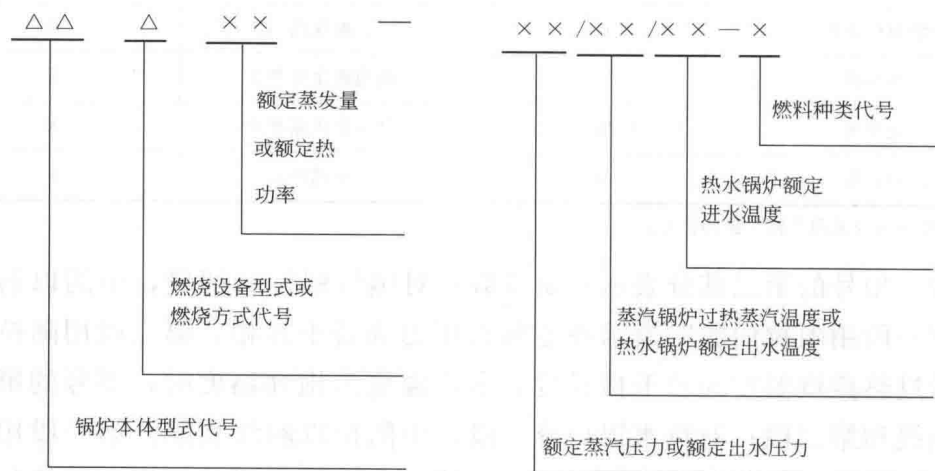


图 1-1 工业锅炉型号组成示意图

(1) 型号的第一部分表示锅炉本体型式、燃烧设备型式或燃烧方式和锅炉容量，共分三段。第一段用两个大写汉语拼音字母表示锅炉本体型式（表 1-1）；第二段用一个大写汉语拼音字母表示燃烧设备型式或燃烧方式（表 1-2）；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 1-1 锅炉本体型式代号

锅炉类别	锅 炉 型 式	代 号
锅壳锅炉	立式火管	LH
	立式水管	LS
	立式无管	LW
	卧式外燃	WW
	卧式内燃	WN
水管锅炉	单锅筒纵置	DZ
	单锅筒横置	DH
	单锅筒立式	DL
	双锅筒纵置	SZ
	双锅筒横置	SH
	强制循环	QX

注：水火管混合式锅炉，以锅炉主要受热面型式来决定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 1-2 燃烧设备型式或燃烧方式代号

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

注：抽板顶升采用下饲炉排的代号。

(2) 型号的第二部分表示介质参数。对蒸汽锅炉分两段，中间以斜线相隔，第一段用阿拉伯数字表示额定蒸汽压力为若干兆帕；第二段用阿拉伯数字表示过热蒸汽温度为若干摄氏度，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，中间也以斜线相隔，第一段用阿拉伯数字表示额定出水压力为若干兆帕；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摄氏度。

(3) 型号的第三部分表示燃料种类。用大写汉语拼音字母表示燃料品种，同时用罗马数字表示同一燃料品种的不同类别与其并列（表 1-3）。如同时使用几种燃料，主要燃料放在前面，中间以顿号隔开。

有机热载体锅炉型号编制方法按《有机热载体炉》（GB/T 17410—2008）执行，型号表示方法如图 1-2 所示。

表 1-3 燃料种类代号

燃 烧 种 类	代 号	燃 烧 种 类	代 号
烟煤Ⅰ类	AⅠ	褐煤	H
烟煤Ⅱ类	AⅡ	贫煤	P
烟煤Ⅲ类	AⅢ	木柴	M
无烟煤Ⅱ类	WⅡ	甘蔗渣	G
无烟煤Ⅲ类	WⅢ	油	Y
型煤	X	气	Q
水煤浆	J	稻壳	D

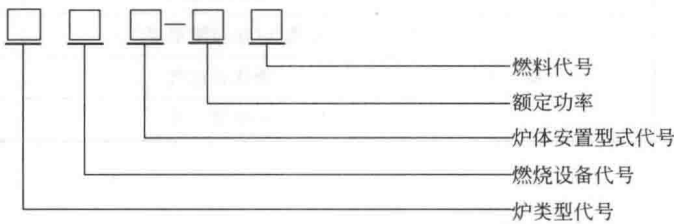


图 1-2 有机热载体锅炉型号组成示意图

有机热载体锅炉类型代号按表 1-4 规定。

有机热载体锅炉燃烧设备代号按表 1-5 规定。

表 1-4 有机热载体锅炉类型代号

有机热载体锅炉类型	代 号
液相炉	Y
气相炉	Q

表 1-5 有机热载体锅炉燃烧设备代号

燃 烧 设 备	代 号	燃 烧 设 备	代 号
链条炉排	L	水煤浆燃烧器	J
往复炉排	W	煤粉燃烧器	F
抛煤机炉排	P	油燃烧器	Y
其他炉排	G	气燃烧器	Q

有机热载体锅炉炉体安置型式代号按表 1-6 规定。

表 1-6 有机热载体锅炉炉体安置型式代号

安 置 型 式	代 号	安 置 型 式	代 号
立式	L	其他	Q
卧式	W	—	—

有机热载体锅炉燃料代号按表 1-7 规定。

表 1-7 有机热载体锅炉燃料代号

燃 烧 类 别	类 别 代 号	品 种	品 种 代 号
煤类	M	无烟煤	W
		烟煤	A
		其他煤	H
		水煤浆	J
		煤粉等	F
油类	Y	柴油	C
		重油、渣油等	Z
气类	Q	天然气(包括城市煤气)	T
		液化石油气	Y
		焦炉煤气等	J

三、 锅炉系统和工作过程

1. 锅炉系统组成

锅炉系统是指包含锅炉本体、锅炉管道（含锅炉工质进口管道、锅炉工质出口至用热设备的管道）、锅炉安全附件、仪表、锅炉辅助设备和锅炉控制系统的集合体，也称锅炉岛。

锅炉本体由锅筒、受热面及其集箱和连接管道，炉膛、燃烧设备和空气预热器（包括烟道和风道），构架（包括平台和扶梯），炉墙和除渣设备等组成。

锅炉范围内管道：①电站锅炉，包括锅炉主给水管道、主蒸汽管道、再热蒸汽管道等；②电站锅炉以外的锅炉，分为有分汽（水、油）缸的锅炉和无分汽（水、油）缸的锅炉。有分汽（水、油）缸的锅炉，包括锅炉给水（油）阀出口和分汽（水、油）缸出口与外部管道连接的第一道环向接头的焊缝内、法兰连接的第一个法兰密封面以内的承压管道〔含分汽（水、油）缸〕；无分汽（水、油）缸的锅炉，包括锅炉给水（油）阀出口和锅炉主蒸汽（水、油）出口阀以内的承压管道。锅炉系统的管道，在能效评估中一般含锅炉出口至用热设备的管道。

锅炉安全附件和仪表是指用来控制锅炉安全和经济运行的一些附件与仪表装置。主要包括安全阀、压力测量装置、水（液）位测量与示控装置、温度测量装置、排污和放水装置等安全附件，以及安全保护装置和相关仪表。

锅炉辅助设备及系统是指辅助锅炉主机运行的主要设备，主要包括燃料

制备、风机、水泵、水处理设备、控制污染排放的烟气净化设备及系统。

2. 工作过程

在锅炉运行中进行着三个主要过程。

① 燃料在炉内燃烧，其化学贮藏能以热能的形式释放出来，使火焰和燃烧产物（烟气和灰渣）具有高温。

② 高温火焰和烟气通过受热面向工质传递热量。

③ 工质被加热，其温度升高或者汽化为饱和蒸汽，或再进一步被加热成为过热蒸汽。

以上三个过程是互相关联并且同时进行的，实现着能量的转换和传递。伴随着能量的转换和传递还进行着物质的流动和变化。

① 工质，例如给水（或回水）进入锅炉，最后以蒸汽（或热水）的形式供出。

② 燃料，例如煤进入炉内燃烧，其可燃部分燃烧后连同原含水分转化为烟气，其原含灰分则残存为灰渣。

③ 空气送入炉内，其中氧气参加燃烧反应，过剩的空气和反应剩余的惰性气体混在烟气中排出。

水-汽系统、煤-灰系统和风-烟系统是锅炉的三大主要系统，这三个系统的工作是同时进行的。

通常将燃料和烟气这一侧所进行的过程（包括燃烧、放热、排渣、气体流动等）总称为“炉内过程”；把水、汽这一侧所进行的过程（水和蒸汽流动、吸热、汽化、汽水分离、热化学过程等）总称为“锅内过程”。

• 第二节 •

燃料特性及其燃烧

一、燃料及其基本特性

燃料是指在空气中燃烧并能放出大量热量的气体、液体或固体，且在