



中华人民共和国国家标准

GB/T 10184—2015
代替 GB/T 10184—1988

电站锅炉性能试验规程

Performance test code for utility boiler



2015-12-10 发布

2016-07-01 实施

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局
中国国家标准化管理委员会 发布

目 次

前言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和符号	2
3.1 术语和定义	2
3.2 符号	3
4 试验项目和要求	16
4.1 试验项目	16
4.2 锅炉机组热平衡系统边界	16
4.3 试验前应达成的协议	22
4.4 试验大纲	22
4.5 试验条件	22
4.6 机组稳定时间	22
4.7 预备性试验	23
4.8 正式试验	23
4.9 试验记录	24
4.10 试验工况和试验数据的舍弃	24
4.11 锅炉效率试验	25
5 测试项目、仪器和测试方法	25
5.1 主要测量项目	25
5.2 测试仪器	27
5.3 温度测量	27
5.4 压力和压差测量	28
5.5 流量测量	28
5.6 燃料量和脱硫剂量	29
5.7 燃料和脱硫剂取样	30
5.8 燃料和脱硫剂分析	30
5.9 灰、渣测量和取样分析	31
5.10 烟气取样和分析	31
6 基础计算	32
6.1 空气流量	32
6.2 烟气流量	33
6.3 理论干空气量和修正的理论干空气量	33
6.4 理论干烟气量和修正的理论干烟气量	34
6.5 过量空气系数	35
6.6 钙硫摩尔比	35
6.7 炉内脱硫效率	35

6.8	添加脱硫剂后入炉灰分	36
6.9	添加脱硫剂后修正的理论干空气量和修正的理论干烟气量	36
6.10	添加脱硫剂后过量空气系数	37
7	效率计算	37
7.1	定义式	37
7.2	输入热量	39
7.3	输出热量	42
7.4	锅炉各项热损失	44
7.5	添加脱硫剂后锅炉效率	47
7.6	高温脱硝装置对锅炉效率的影响	50
7.7	换算到设计(保证)条件下的锅炉效率	51
8	其他性能试验	52
8.1	锅炉最大连续蒸发量	52
8.2	锅炉额定蒸发量、蒸汽压力和温度	52
8.3	稳定燃烧最低蒸发量和液态排渣临界蒸发量	53
8.4	锅炉 NO _x 排放浓度	53
8.5	锅炉 SO ₂ 排放浓度	53
8.6	空气预热器性能	54
8.7	汽水系统压降	55
8.8	蒸汽品质	55
8.9	循环流化床锅炉脱硫效率	56
9	试验报告	56
9.1	试验背景	56
9.2	锅炉主辅设备介绍	56
9.3	试验目的	56
9.4	试验内容	56
9.5	测试项目、仪器设备、测点布置和测试方法	56
9.6	试验数据整理	56
9.7	试验结果分析	56
9.8	结论	56
9.9	附件	56
附录 A (资料性附录)	常用法定计量单位及其换算	57
附录 B (规范性附录)	网格法等面积的划分原则及代表点的确定	59
附录 C (资料性附录)	气体浓度单位换算	61
附录 D (资料性附录)	锅炉灰、渣比例	62
附录 E (资料性附录)	常用气体和灰(渣)特性	64
附录 F (规范性附录)	煤、灰和吸收剂的比热	68
附录 G (资料性附录)	燃料基质换算	69
附录 H (资料性附录)	烟气中 CO ₂ 含量的计算方法	70
附录 I (规范性附录)	锅炉散热损失	71
参考文献		73

前 言

本标准按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本标准代替 GB/T 10184—1988《电站锅炉性能试验规程》，与 GB/T 10184—1988 相比，主要变化如下：

- 补充和修改了术语；
- 根据 GB 3101《有关量、单位和符号的一般原则》修改了原标准物理量的定义和符号；
- 修改了锅炉效率计算公式；
- 修改了仪器设备的使用建议和规定；
- 修改了锅炉机组热平衡系统边界；
- 增加了添加脱硫剂的锅炉效率计算；
- 增加了装有高温脱硝装置的锅炉效率计算；
- 增加了烟气中 NO_x 和 SO_2 浓度的测量项目；
- 增加了空气预热器性能计算部分公式；
- 删除了制粉系统主要特性参数测定的有关内容；
- 删除了误差分析的有关内容；
- 删除了部分附录。

本标准由全国锅炉压力容器标准化技术委员会(SAC/TC 262)提出并归口。

本标准起草单位：上海发电设备成套设计研究院、西安热工研究院有限公司、中国特种设备检测研究院、上海市特种设备监督检验技术研究院。

本标准主要起草人：俞谷颖、刘振琪、张富祥、吴生来、管坚、蔡昊。

本标准所代替标准的历次版本发布情况为：

- GB/T 10184—1988。

电站锅炉性能试验规程

1 范围

本标准规定了燃煤、油、气(主要指天然气)和生物质燃料的电站锅炉性能试验(包括鉴定试验、验收试验和常规试验)方法。

本标准适用范围如下:

- a) 适用于蒸汽流量不低于 35 t/h,蒸汽压力不低于 3.8 MPa,蒸汽温度不低于 440 °C 的电站锅炉;
- b) 适用于为了其他目的(包括燃烧调整、燃料变动、设备改进等)进行的锅炉性能试验;
- c) 燃用其他燃料的电站锅炉性能试验可参照本标准执行。

本标准不适用于核电站蒸汽发生器的性能试验以及余热锅炉、垃圾焚烧锅炉的性能试验。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件,仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

- GB/T 211 煤中全水分的测定方法
- GB/T 212 煤的工业分析方法
- GB/T 213 煤的发热量测定方法
- GB/T 214 煤中全硫的测定方法
- GB/T 218 煤中碳酸盐二氧化碳含量的测定方法
- GB 474 煤样的制备方法
- GB/T 476 煤中碳和氢的测定方法
- GB/T 483 煤炭分析试验方法一般规定
- GB/T 3286.8 石灰石 白云石分析方法 灼烧减量的测定
- GB/T 3286.9 石灰石 白云石分析方法 二氧化碳量的测定
- GB/T 3715 煤质及煤分析有关术语
- GB/T 4756 石油液体手工取样法
- GB/T 6284 化工产品中水分测定的通用方法 干燥减量法
- GB/T 8174 设备及管道绝热效果的测试与评价
- GB/T 10410 人工煤气和液化石油气常量组分气相色谱分析法
- GB/T 12145 火力发电机组及蒸汽动力设备水汽质量
- GB 13223 火电厂大气污染物排放标准
- GB/T 13610 天然气的组成分析 气相色谱法
- GB/T 14416 锅炉蒸汽的采样方法
- GB/T 16157 固定污染源排气中颗粒物测定与气态污染源采样方法
- GB/T 16839.1 热电偶 第 1 部分:分度表
- GB/T 16839.2 热电偶 第 2 部分:允差
- GB/T 17357 设备及管道绝热层表面热损失现场测定 表面温度法

DL/T 567.3	火力发电厂燃料试验方法	飞灰和炉渣样品的采集
DL/T 567.5	火力发电厂燃料试验方法	煤粉细度的测定
DL/T 567.6	火力发电厂燃料试验方法	飞灰和炉渣可燃物测定方法
DL/T 567.8	火力发电厂燃料试验方法	燃油发热量的测定
DL/T 567.9	火力发电厂燃料试验方法	燃油元素分析

3 术语和符号

3.1 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1.1

电站锅炉 utility boiler, power station boiler

利用煤、油、气和生物燃料燃烧释放的热能加热给水,以获得规定参数和品质的蒸汽,并主要用于发电的锅炉机组。

3.1.2

锅炉机组 boiler unit

锅炉本体及辅助、附属监控系统的总称。

3.1.3

输入热量 energy input

相应每千克固体(液体)燃料,或者每标准立方米气体燃料进入锅炉机组热平衡系统边界所有热量的总和,包括入炉燃料的低位发热量(数值上等于收到基低位发热量),燃料、脱硫剂、燃烧用空气、燃油雾化蒸气带入的物理显热和边界内辅机设备动力能耗当量热。

3.1.4

输出热量 energy output

相应每千克或每标准立方米燃料,工质离开锅炉热平衡系统边界的总有效热量。

3.1.5

热损失 heat loss

输入热量中未被有效利用的热量。

3.1.6

基准温度 reference temperature

进出锅炉热平衡边界的物质热量起算点温度。

注:本标准规定基准温度为 25℃。

3.1.7

最大连续蒸发量 boiler maximum continuous rating; BMCR

锅炉燃用设计燃料,在设计的给水参数、蒸汽参数及机组运行方式下,锅炉连续稳定运行所能输出的最大过热蒸汽流量。

3.1.8

额定蒸发量 rated rating

锅炉设备厂家根据汽轮机铭牌工况或汽轮机热耗率验收工况(THA)设计计算的锅炉蒸发量。

3.1.9

稳定燃烧最低蒸发量 minimum capacity with stable combustion

锅炉燃用设计燃料低负荷运行时,不投助燃燃料和不投运等离子点火装置,连续稳定燃烧所能输出的最低过热蒸汽流量。

注:对于液态排渣锅炉,为稳定流渣的最低蒸发量(即液态排渣临界蒸发量)。

3.1.10

理论干空气量 **theoretical air quantity**

每千克固体、液体或每标准立方米气体燃料按照化学当量比完全燃烧所需的空气量。

3.1.11

理论干烟气量 **theoretical flue gas quantity**

每千克固体、液体或每标准立方米气体燃料与其化学当量空气完全燃烧所产生的干烟气量。

3.1.12

过量空气系数 **excess air coefficient**

燃料燃烧时实际供给的空气量与理论空气量之比值。

3.1.13

漏风率 **air leakage rate**

漏入锅炉某段烟道的空气质量占该烟道进口烟气质量的百分率。

3.1.14

锅炉热效率 **boiler thermal efficiency**

输出热量与输入热量百分比。

3.1.15

燃料效率 **fuel efficiency**

输出热量与输入锅炉系统边界燃料低位发热量的百分比。

3.1.16

脱硫剂 **desulfurizer**

用于捕捉和吸收烟气中 SO_2 的添加剂。

注:本标准专指石灰石。

3.1.17

钙硫摩尔比 **Ca/S molar ratio**

入炉脱硫剂中钙基含量与燃料中硫含量的摩尔比。

3.1.18

煅烧反应 **calcination reaction**

脱硫剂(其主要成分为 CaCO_3 , 有少量的 MgCO_3 、杂质和水)分解为 CaO 和 CO_2 的一种吸热化学反应。

3.1.19

脱硫剂转化率 **desulfurizer conversion rate**

经过煅烧反应分解后的脱硫剂与进入锅炉总的脱硫剂之比。

3.1.20

硫酸盐化反应 **sulfation reaction**

CaO 与 O_2 、 SO_2 生成 CaSO_4 的一种放热化学反应。

3.1.21

脱硫效率 **desulfurization efficiency**

燃料中没有以 SO_2 形式排放的硫占入炉燃料硫分的百分比。

3.2 符号

下列符号适用本文件。

本标准符号采用英文字母和希腊字母表示,下角标均采用英文缩写。

表 1 为本标准采用的符号一览表,表 2 为下角标说明。

本标准中所采用的立方米(m^3),除有特殊说明外,均为标准状态。

为方便使用,本标准给出了常用法定计量单位及其换算方法,参见附录 A。

表 1 符号一览表

符 号	含 义	单 位
A	被测截面面积	m^2
a_i	系数	—
B	矩形截面边长	mm
c_{as}	飞灰比热	$\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
c_c	煤中可燃物质的比热	$\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
$c_{\text{c,ar}}$	入炉煤比热	$\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
$c_{\text{c,d}}$	煤干燥基比热	$\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
c_{CFB}	循环流化床锅炉散热面积修正系数	—
c_{des}	脱硫剂比热	$\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
c_f	燃料比热	$\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K}), \text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$
c_{fo}	燃油比热	$\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
$c_{\text{p,a}}$	空气定压比热容	$\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$
$c_{\text{p,a,d}}$	干空气定压比热容	$\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$
$c_{\text{p,a,oth}}$	进入系统边界的(未经空气预热器)其他空气定压比热容	$\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$
$c_{\text{p,a,p}}$	进入系统的一次风定压比热容	$\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$
$c_{\text{p,a,rc}}$	基准温度下空气定压比热容	$\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$
$c_{\text{p,a,s}}$	进入系统的二次风定压比热容	$\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$
$c_{\text{p,ca}}$	冷却空气定压比热容	$\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$
$c_{\text{p,CO}}$	一氧化碳定压比热容	$\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$
$c_{\text{p,CO}_2}$	二氧化碳定压比热容	$\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$
c_{pd}	沉降灰比热	$\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
$c_{\text{p,fg}}$	烟气定压比热容	$\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$
$c_{\text{p,fg,d}}$	干烟气定压比热容	$\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$
$c_{\text{p,fg,DEN,en}}$	脱硝装置进口烟气定压比热容	$\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$
$c_{\text{p,fg,DEN,lv}}$	脱硝装置出口烟气定压比热容	$\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$
$c_{\text{p,g}}$	气体燃料定压比热容	$\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$
$c_{\text{p,H}_2}$	氢气定压比热容	$\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$
$c_{\text{p,N}_2}$	氮气定压比热容	$\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$

表 1 (续)

符 号	含 义	单 位
$c_{p,NO}$	一氧化氮定压比热容	$\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$
c_{p,O_2}	氧气定压比热容	$\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$
c_{p,SO_2}	二氧化硫定压比热容	$\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$
$c_{p,wv}$	按照进入系统边界的空气加权平均温度确定的水蒸气定压比热容	$\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$
c_{rs}	灰(渣)比热	$\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
c_s	炉渣比热	$\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
D	蒸发量	t/h
d	管道直径	mm
E	锅炉表面辐射力率	kW/m^2
$H_{cw,en}$	冷却设备进口冷却水焓	kJ/kg
$H_{cw,lv}$	冷却设备出口冷却水焓	kJ/kg
$H_{cw,SC,en}$	冷渣器进口冷却水焓	kJ/kg
$H_{cw,SC,lv}$	冷渣器出口冷却水焓	kJ/kg
$H_{fw,ECO,en}$	省煤器进口给水焓	kJ/kg
$H_{sp,dRH}$	再热器减温器减温水焓	kJ/kg
$H_{sp,dSH}$	过热器减温器减温水焓	kJ/kg
$H_{st,at,en}$	雾化蒸汽在进口参数下的焓	kJ/kg
$H_{st,aux}$	辅助用蒸汽焓	kJ/kg
$H_{st,RH,en}$	再热器进口蒸汽焓	kJ/kg
$H_{st,RH,lv}$	再热器出口蒸汽焓	kJ/kg
$H_{st,sat,re}$	基准温度下饱和蒸汽焓	kJ/kg
$H_{st,SH,lv}$	过热器出口蒸汽焓	kJ/kg
$H_{w,sat}$	饱和水焓	kJ/kg
$h_{a,ab}$	空气绝对湿度	kg/kg
$h_{a,re}$	空气相对湿度	%
h_g	气体燃料湿度	kg/m^3
i	从圆形截面中心起算的测点序号或某种燃料组分	—
k	动压测量管系数	—
L	矩形截面边长	mm
m	碳氢化合物中碳原子数	—

表 1 (续)

符 号	含 义	单 位
N	圆形截面所需划分的等面积圆环数,矩形截面测点排数	—
n	碳氢化合物中氢原子数	—
P	蒸汽压力	MPa
P_{aux}	系统边界内辅助设备功率	kW
$p_{\text{AH,en}}$	空气预热器进口烟(风)道静压力	Pa
$p_{\text{AH,lv}}$	空气预热器出口烟(风)道静压力	Pa
p_{a}	空气压力	Pa
p_{at}	大气压力	Pa
p_{en}	汽水系统或管组进口静压力	MPa
p_{lv}	汽水系统或管组出口静压力	MPa
$p_{\text{wv,sat}}$	在大气温度下的水蒸气饱和压力	Pa
$Q_{\text{n,d}}$	进入系统的干空气所携带的热量	kJ/kg
Q_{aux}	系统边界内辅助设备带入的热量	kJ/kg
Q_{bd}	排污水带走的热量	kJ/kg
Q_{BMCR}	锅炉最大输出热量	kJ/kg, MW
Q_{cw}	冷却水带走的热量	kJ/kg
Q_{des}	脱硫剂物理显热	kJ/kg
Q_{ex}	输入系统边界的外来热量	kJ/kg, kJ/m ³
Q_{f}	燃料物理显热	kJ/kg, kJ/m ³
$Q_{\text{L,im}}$	解冻燃料用热量	kJ/kg
$Q_{\text{fg,DEN}}$	脱硝装置进出口烟气热量增量	kJ/kg
Q_{in}	输入系统边界的热量总和	kJ/kg, kJ/m ³
Q_{loss}	锅炉总损失热量	kJ/kg, kJ/m ³
$Q_{\text{net,ar}}$	入炉燃料(收到基)低位发热量	kJ/kg, kJ/m ³
$Q_{\text{net,ar,i}}$	入炉燃料某种组分的低位发热量	kJ/kg
$Q_{\text{net,ar,to}}$	入炉混合燃料计算低位发热量	kJ/kg
$Q_{\text{net,CmHn}}$	碳氢化合物低位发热量	kJ/m ³
$Q_{\text{net,g}}$	气体燃料低位发热量	kJ/m ³
$Q_{\text{net,pr}}$	石子煤低位发热量	kJ/kg
Q_{oth}	除 $Q_2 \sim Q_7$ 以外的锅炉其他损失热量	kJ/kg, kJ/m ³
$Q_{\text{orth,des}}$	添加脱硫剂后每千克燃料除 $Q_{2,\text{des}} \sim Q_{7,\text{des}}$ 以外的锅炉其他损失热量	kJ/kg

表 1 (续)

符 号	含 义	单 位
Q_{out}	输出系统边界的有效热量	$\text{kJ/kg}, \text{kJ/m}^3$
Q_{pr}	石子煤带走的热量	kJ/kg
Q_r	锅炉额定输出热量	$\text{kJ/kg}, \text{MW}$
Q_{sc}	冷渣器带走的热量	kJ/kg
$Q_{st,at}$	雾化蒸汽带入的热量	kJ/kg
$Q_{st,aux}$	辅助用蒸汽带走的热量	kJ/kg
$Q_{st,RH}$	再热蒸汽带走的热量	kJ/kg
$Q_{st,SH}$	过热蒸汽带走的热量	kJ/kg
Q_{wv}	进入系统边界的空气中水蒸气所携带的热量	kJ/kg
Q_2	每千克(标准立方米)燃料产生的排烟损失热量	$\text{kJ/kg}, \text{kJ/m}^3$
$Q_{2,des}$	添加脱硫剂后每千克燃料产生的排烟损失热量	kJ/kg
$Q_{2,fg,d}$	干烟气带走的热量	$\text{kJ/kg}, \text{kJ/m}^3$
$Q_{2,wv,fg}$	烟气所含水蒸气带走的热量	$\text{kJ/kg}, \text{kJ/m}^3$
Q_3	每千克(标准立方米)燃料产生的气体未完全燃烧损失热量	$\text{kJ/kg}, \text{kJ/m}^3$
$Q_{3,des}$	添加脱硫剂后每千克燃料产生的气体未完全燃烧损失热量	$\text{kJ/kg}, \text{kJ/m}^3$
Q_4	每千克(标准立方米)燃料产生的固体未完全燃烧损失热量	$\text{kJ/kg}, \text{kJ/m}^3$
$Q_{4,des}$	添加脱硫剂后每千克燃料产生的固体未完全燃烧损失热量	kJ/kg
Q_5	每千克(标准立方米)燃料产生的锅炉散热损失热量	$\text{kJ/kg}, \text{kJ/m}^3$
$Q_{5,des}$	添加脱硫剂后每千克燃料产生的锅炉散热损失热量	kJ/kg
Q_6	每千克(标准立方米)燃料产生的灰、渣物理显热损失热量	$\text{kJ/kg}, \text{kJ/m}^3$
$Q_{6,des}$	添加脱硫剂后每千克燃料产生的灰、渣物理显热损失热量	kJ/kg
$Q_{7,des}$	相应每千克燃料脱硫损失热量	kJ/kg
q_{ex}	外来热量与燃料低位发热量的百分比	%
$q_{m,a,oth}$	进入系统边界的(未经空气预热器)其他空气质量流量	kg/h
$q_{m,a,p}$	进入系统边界的一次风质量流量	kg/h
$q_{m,a,s}$	进入系统边界的二次风质量流量	kg/h
$q_{m,a,st}$	标准状态下干空气质量流量	kg/h
$q_{m,bd}$	排污水质量流量	kg/h
$q_{m,c}$	入炉燃料质量流量	kg/h
$q_{m,ca}$	冷却空气质量流量	kg/h
$q_{m,cw}$	进入锅炉系统边界的冷却水质量流量	kg/h

表 1 (续)

符 号	含 义	单 位
$q_{m,cw,SC}$	冷渣器冷却水质量流量	kg/h
$q_{m,des}$	入炉脱硫剂质量流量	kg/h
$q_{m,f}$	燃料质量流量	kg/h
$q_{m,f,i}$	某种燃料组分的消耗量	kg/h, m ³ /h
$q_{m,fw,ECO,en}$	省煤器进口给水质量流量	kg/h
$q_{m,pr}$	中速磨煤机排出的石子煤的质量流量	kg/h
$q_{m,sp,dRH}$	再热器减温器减温水质量流量	kg/h
$q_{m,sp,dSH}$	过热器减温器减温水质量流量	kg/h
$q_{m,st,at}$	雾化蒸汽质量流量	kg/h
$q_{m,st,aux}$	辅助用蒸汽质量流量	kg/h
$q_{m,st,RH,en}$	再热器进口蒸汽质量流量	kg/h
$q_{m,st,RH,lv}$	再热器出口蒸汽质量流量	kg/h
$q_{m,st,SH,lv}$	过热器出口蒸汽质量流量	kg/h
q_{oth}	锅炉其他热损失	%
$q_{oth,t}$	热效率计算锅炉其他热损失	%
$q_{oth,des}$	添加脱硫剂后除 $q_{2,des} \sim q_{7,des}$ 以外的锅炉其他热损失	%
$q_{v,a}$	空气体积流量	m ³ /h
$q_{v,a,st}$	标准状态下空气体积流量	m ³ /h
q_2	排烟热损失	%
$q_{2,des}$	添加脱硫剂后排烟热损失	%
$q_{2,t}$	热效率计算排烟热损失	%
q_3	气体未完全燃烧热损失	%
$q_{3,des}$	添加脱硫剂后气体未完全燃烧热损失	%
$q_{3,t}$	热效率计算气体未完全燃烧热损失	%
q_4	固体未完全燃烧热损失	%
$q_{4,des}$	添加脱硫剂后固体未完全燃烧热损失	%
$q_{4,t}$	热效率计算固体未完全燃烧热损失	%
q_5	锅炉散热损失	%
$q_{5,BMCR}$	最大出力下的锅炉散热损失	%
$q_{5,des}$	添加脱硫剂后锅炉散热损失	%
$q_{5,t}$	热效率计算锅炉散热损失	%

表 1 (续)

符 号	含 义	单 位
q_6	灰、渣物理显热损失	%
$q_{6,des}$	添加脱硫剂后灰、渣物理显热损失	%
$q_{6,t}$	热效率计算灰、渣物理显热损失	%
$q_{7,des}$	添加脱硫剂后脱硫热损失	%
R	圆形截面半径	mm
$r_{Ca/S}$	钙硫摩尔比	—
r_i	测点距圆形截面中心的距离	mm
T_K	工质温度	K
t	蒸汽温度	°C
t_a	空气温度	°C
$t_{a,AH,en,d}$	设计的(保证的)空气预热器进口空气温度	°C
$t_{a,AH,en,m}$	实测空气预热器进口空气温度	°C
$t_{a,oth}$	进入系统边界的(未经空气预热器)其他空气温度	°C
$t_{a,wm}$	进入系统的空气加权平均温度	°C
$t_{a,p}$	进入系统的一次风温度	°C
$t_{a,s}$	进入系统的二次风温度	°C
t_{as}	飞灰温度	°C
t_c	煤的温度	°C
$t_{ca,en}$	设备进口冷却空气温度	°C
$t_{ca,lv}$	设备出口冷却空气温度	°C
t_{des}	进入系统边界的脱硫剂温度	°C
t_f	进入系统边界的燃料温度	°C
$t_{fg,AH,en,m}$	实测空气预热器进口烟气温度	°C
$t_{fg,AH,lv}$	空气预热器出口烟气温度	°C
$t_{fg,AH,lv,m}$	实测空气预热器出口烟气温度	°C
$t_{fg,AH,lv,nl}$	经无空气泄漏修正的空气预热器出口烟气温度	°C
$t_{fg,AH,lv,cr,a}$	换算到设计的(保证的)空气预热器进口空气温度下的排烟温度	°C
$t_{fg,AH,lv,cr,fw}$	换算到设计的(保证的)给水温度下的排烟温度	°C
$t_{fg,DEN,en}$	脱硝装置进口烟气温度	°C
$t_{fg,DEN,lv}$	脱硝装置出口烟气温度	°C
$t_{fg,ECO,en}$	省煤器进口烟气温度	°C

表 1 (续)

符 号	含 义	单 位
$t_{fg,ECO,lv}$	省煤器出口烟气温度	°C
$t_{fw,d}$	设计的(保证的)给水温度	°C
$t_{fw,m}$	实测给水温度	°C
t_{pd}	沉降灰温度	°C
t_{re}	基准温度	°C
t_{rs}	灰(渣)温度	°C
t_s	炉渣温度	°C
$V_{a,d}$	实际送入炉内的干空气量	m^3/kg
$V_{a,d,des}$	添加脱硫剂后的入炉干空气量	m^3/kg
$V_{a,d,th}$	理论干空气量	m^3/kg
$V_{a,d,th,cr}$	修正的理论干空气量	m^3/kg
$V_{a,d,th,cr,des}$	添加脱硫剂后修正的理论干空气量	m^3/kg
$V_{a,d,th,g}$	燃用气体燃料的理论干空气量	m^3/m^3
$V_{CO_2,c,b}$	根据每千克或每立方米燃料实际燃烧掉的碳计算的二氧化碳体积	$m^3/kg, m^3/m^3$
$V_{CO_2,c,b,des}$	根据每千克添加脱硫剂的燃料实际燃烧掉的碳计算的二氧化碳体积	m^3/kg
$V_{fg,d}$	每千克燃料燃烧生成的干烟气体积	m^3/kg
$V_{fg,d,AH,lv}$	每千克(标准立方米)燃料燃烧生成的空气预热器出口处的干烟气体积	$m^3/kg, m^3/m^3$
$V_{fg,d,AH,lv,des}$	添加脱硫剂后每千克燃料燃烧生成的空气预热器出口处的干烟气体积	m^3/kg
$V_{fg,d,des}$	添加脱硫剂后每千克燃料燃烧生成的干烟气体积	m^3/kg
$V_{fg,DEN,en}$	脱硝装置进口烟气流	m^3/kg
$V_{fg,DEN,lv}$	脱硝装置出口烟气流	m^3/kg
$V_{fg,d,th}$	理论干烟气流	m^3/kg
$V_{fg,d,th,cr}$	修正的理论干烟气流	m^3/kg
$V_{fg,d,th,cr,des}$	添加脱硫剂后修正的理论干烟气流	m^3/kg
$V_{fg,d,th,g}$	气体燃料的理论干烟气流	m^3/m^3
$V_{wv,fg,AH,lv}$	每千克(标准立方米)燃料燃烧生成的空气预热器出口处的烟气中水蒸气体积	$m^3/kg, m^3/m^3$
$V_{wv,fg,AH,lv,des}$	添加脱硫剂后每千克燃料燃烧生成的空气预热器出口处的烟气中水蒸气体积	m^3/kg
v_a	被测截面空气流速	m/s
ω_{as}	飞灰占燃料总灰量的质量分数	%
$\omega_{as,ad}$	空气干燥基灰分的质量分数	%
$\omega_{as,ar}$	入炉燃料(收到基)中灰分的质量分数	%

表 1 (续)

符 号	含 义	单 位
$w_{as,d}$	入炉煤(干燥基)中灰分的质量分数	%
$w_{as,des}$	相应每千克入炉燃料,脱硫剂灰分的质量分数	%
$w_{as,g}$	气体燃料中灰分的质量分数	%
$w_{as,to,des}$	添加脱硫剂后,相应每千克入炉燃料灰分的质量分数	%
$w_{C,ar}$	入炉燃料(收到基)中元素碳的质量分数	%
$w_{c,as}$	飞灰中可燃物的质量分数	%
$w_{c,b}$	实际燃烧掉的碳占入炉燃料的质量分数	%
$w_{c,b,des}$	添加脱硫剂后实际燃烧掉的碳占入炉燃料的质量分数	%
$w_{C,g}$	气体燃料中元素碳的质量分数	%
$w_{c,pd}$	沉降灰中可燃物的质量分数	%
$w_{c,rs,m}$	灰渣平均可燃物的质量分数	%
$w_{c,s}$	炉渣中可燃物的质量分数	%
$w_{CaCO_3,des}$	脱硫剂中碳酸钙的质量分数	%
$w_{CaCO_3,ud}$	相应每千克入炉燃料,脱硫剂未分解的碳酸钙质量分数	%
w_{CaO}	相应每千克入炉燃料,脱硫剂煅烧反应后未发生硫酸盐化反应的氧化钙质量分数	%
w_{CaSO_4}	相应每千克入炉燃料,脱硫后生成的硫酸钙质量分数	%
$w_{f,i}$	某种燃料消耗量占总燃料消耗量的质量分数	%
$w_{fg,\Delta H,en}$	空气预热器进口烟气质量分数	%
$w_{fg,\Delta H,lv}$	空气预热器出口烟气质量分数	%
$w_{fg,d,th,cr}$	修正的理论干烟气质量流量分数	%
$w_{H,ar}$	入炉燃料(收到基)中元素氢的质量分数	%
$w_{H,g}$	气体燃料中元素氢的质量分数	%
$w_{m,ad}$	入炉燃料(空气干燥基)中水分质量分数	%
$w_{m,ar}$	入炉燃料(收到基)中水分的质量分数	%
$w_{m,des}$	脱硫剂中水分质量分数	%
$w_{N,ar}$	入炉燃料(收到基)中元素氮的质量分数	%
$w_{N,g}$	气体燃料中元素氮的质量分数	%
$w_{O,ar}$	入炉燃料(收到基)中元素氧的质量分数	%
$w_{O,g}$	气体燃料中元素氧的质量分数	%
w_{pd}	沉降灰占燃料总灰量的质量分数	%
w_s	炉渣占燃料总灰量的质量分数	%
$w_{S,ar}$	入炉燃料(收到基)中元素硫的质量分数	%
$w_{S,g}$	气体燃料中元素硫的质量分数	%

表 1 (续)

符 号	含 义	单 位
$\omega_{v, ar}$	入炉煤(收到基)中挥发分质量分数	%
$\omega_{v, daf}$	入炉煤(干燥无灰基)中挥发分质量分数	%
$\omega_{wv, g}$	气体燃料中水蒸气的质量分数	%
α	过量空气系数	—
$\alpha_{AH, en, cr}$	修正的空气预热器进口过量空气系数	—
$\alpha_{AH, lv, cr}$	修正的空气预热器出口过量空气系数	—
α_{cr}	修正的过量空气系数	—
$\alpha_{cr, des}$	添加脱硫剂后修正的过量空气系数	—
β	锅炉表面辐射率系数	—
Δp	压差	Pa, MPa
Δp_{AH}	空气预热器进出口烟(风)道静压差	Pa
η	锅炉燃料效率、锅炉效率	%
$\eta_{CaCO_3, dec}$	碳酸钙分解率	%
η_{des}	添加脱硫剂后锅炉效率	%
$\eta_{fg, AH}$	空气预热器烟气侧效率	%
$\eta_{lg, AH}$	空气预热器漏风率	%
η_{SO_2}	添加脱硫剂后炉内脱硫效率	%
η_t	锅炉热效率	%
$\eta_{tr, aux}$	系统边界内辅助设备总的传动效率	%
ρ_a	空气密度	kg/m ³
$\rho_{a, d}$	干空气密度	kg/m ³
$\rho_{a, oth}$	进入系统边界的(未经空气预热器)其他空气密度	kg/m ³
$\rho_{a, p}$	进入系统边界的一次风密度	kg/m ³
$\rho_{a, re}$	基准温度下空气密度	kg/m ³
$\rho_{a, s}$	进入系统边界的二次风密度	kg/m ³
$\rho_{a, st}$	标准状态下空气的密度	kg/m ³
$\rho_{as, fg}$	烟气中飞灰质量浓度	g/m ³
$\rho_{as, g}$	气体燃料中灰的质量浓度	g/m ³
$\rho_{C, fg}$	烟气中碳的质量浓度	g/m ³

表 1 (续)

符 号	含 义	单 位
$\rho_{\text{fg,AH,en}}$	空气预热器进口烟气密度	kg/m ³
$\rho_{\text{fg,AH,lv}}$	空气预热器出口烟气密度	kg/m ³
$\rho_{\text{fg,d}}$	按修正理论烟气量计算的干烟气密度	kg/m ³
$\rho_{\text{fg,st}}$	标准状态下烟气密度	kg/m ³
$\rho_{\text{g,st}}$	标准状态下气体燃料的密度	kg/m ³
$\rho_{\text{NO}_x,m}$	烟气中实测的 NO _x 质量浓度	mg/m ³
$\rho_{\text{NO}_x,re}$	换算到过量空气系数为 1.4 时的 NO _x 质量浓度	mg/m ³
$\rho_{\text{SO}_2,m}$	烟气中实测的 SO ₂ 质量浓度	mg/m ³
$\rho_{\text{SO}_2,re}$	换算到过量空气系数为 1.4 时的 SO ₂ 质量浓度	mg/m ³
$\varphi_{\text{CH}_4,\text{fg,d}}$	干烟气中 CH ₄ 的体积分数	%
$\varphi_{\text{C}_m\text{H}_n,\text{fg,d}}$	干烟气中 C _m H _n 的体积分数	%
$\varphi_{\text{C}_m\text{H}_n,g}$	气体燃料中碳氢化合物体积分数	%
$\varphi_{\text{CO,fg}}$	烟气中一氧化碳体积分数	%
$\varphi_{\text{CO,fg,d}}$	干烟气中一氧化碳体积分数	%
$\varphi_{\text{CO,g}}$	气体燃料中一氧化碳体积分数	%
$\varphi_{\text{CO}_2,\text{AH,en}}$	空气预热器进口二氧化碳体积分数	%
$\varphi_{\text{CO}_2,\text{AH,lv}}$	空气预热器出口二氧化碳体积分数	%
$\varphi_{\text{CO}_2,\text{fg}}$	烟气中二氧化碳体积分数	%
$\varphi_{\text{CO}_2,\text{fg,d}}$	干烟气中二氧化碳体积分数	%
$\varphi_{\text{CO}_2,g}$	气体燃料中二氧化碳体积分数	%
$\varphi_{\text{H}_2,\text{fg,d}}$	干烟气中氢气体积分数	%
$\varphi_{\text{H}_2,g}$	气体燃料中氢气体积分数	%
$\varphi_{\text{H}_2\text{S},g}$	气体燃料中硫化氢体积分数	%
$\varphi_{\text{N}_2,\text{fg}}$	烟气中氮气体积分数	%
$\varphi_{\text{N}_2,\text{fg,d}}$	干烟气中氮气体积分数	%
$\varphi_{\text{N}_2,g}$	气体燃料中氮气体积分数	%
$\varphi_{\text{NO,fg}}$	烟气中一氧化氮体积分数	%
$\varphi_{\text{NO,fg,d}}$	干烟气中一氧化氮体积分数	%
$\varphi_{\text{O}_2,\text{fg}}$	烟气中氧气体积分数	%
$\varphi_{\text{O}_2,\text{fg,d}}$	干烟气中氧气体积分数	%
$\varphi_{\text{O}_2,g}$	气体燃料中氧气体积分数	%

表 1 (续)

符 号	含 义	单 位
$\varphi_{\text{SO}_2, \text{fg}}$	烟气中二氧化硫体积分数	%
$\varphi_{\text{SO}_2, \text{fg}, \text{d}}$	干烟气中二氧化硫体积分数	%
$\varphi_{\text{wv}, \text{fg}}$	烟气中水蒸气的体积分数	%
$\varphi_{\text{wv}, \text{g}}$	气体燃料中水蒸气的体积分数	%

表 2 角标说明

角 标	说 明
a	空气
ab	绝对的
ad	附加的, 空气干燥基
ar	入炉燃料, 收到基
as	灰分, 飞灰, 渣, 杂质
at	大气、环境的, 雾化
aux	辅助的
AH	空气预热器
b	燃烧
bd	排污水
C	元素碳
c	计算的, 煤, 可燃物, 燃料
ca	冷却风
cr	修正的
cw	冷却水
d	干的, 干燥基
daf	干燥无灰基
dec	已分解的
DEN	脱硝装置
des	脱硫、脱硫剂
dRH	再热器减温器
dSH	过热器减温器
en	进口截面
ECO	省煤器
f	燃料
fg	烟气
fo	燃油

表 2 (续)

角 标	说 明
fw	给水
g	气体燃料
h	热、能
i	组分,序号
im	解冻
in	进入系统边界
lg	泄漏
loss	总的热损失
lv	出口截面
m	质量,平均的,实测的,水分
net	低位发热量
nl	无空气泄漏
oth	其他的
out	输出系统边界
p	定压的,一次的
pd	沉降灰
pr	石子煤
r	额定
re	基准的,相对的
rec	循环灰
rs	灰渣
RH	再热,再热器
s	炉渣,二次的
sat	饱和的
SC	冷渣器
sp	减温水
st	蒸汽,标准状态
SH	过热,过热器
t	热力的
th	理论的

表 2 (续)

角 标	说 明
to	总的,混合的
tr	传动的
ud	未分解的
um	未测量的
v	体积,挥发分
w	水,水分,风
wm	加权平均
wv	水蒸气
X	辅助机械

4 试验项目和要求

4.1 试验项目

本标准规定了以下项目的试验和测量方法:

- a) 锅炉最大连续蒸发量;
- b) 锅炉额定蒸发量;
- c) 锅炉效率;
- d) 空气预热器烟气侧效率及漏风率;
- e) 锅炉稳定燃烧最低蒸发量;
- f) 保证额定蒸汽温度的锅炉蒸发量范围;
- g) 锅炉汽水系统压降;
- h) 锅炉风烟系统压降;
- i) 锅炉蒸汽品质;
- j) 锅炉 NO_x 排放浓度;
- k) 锅炉 SO₂ 排放浓度。

4.2 锅炉机组热平衡系统边界

根据锅炉燃烧方式以及所用燃料种类,本标准规定的锅炉机组热平衡系统边界见图 1 至图 5,其中图 1 为热平衡图。锅炉机组热平衡系统边界内设备包括:带循环泵的汽水系统、带磨煤机的制粉系统、燃烧设备、脱硝装置、空气预热器、烟气再循环风机及冷渣器(冷渣水热量有效利用)等。暖风器、送风机、引风机、冷一次风机、高压流化风机、密封风机、冷却风机、冷却水泵、油加热器、脱硫剂供给系统、供氨系统等为系统外设备。图 2 为典型的火床锅炉;图 3 为典型的煤粉锅炉;图 4 为典型的燃油、燃气锅炉;图 5 为典型的循环流化床锅炉。

在特殊情况下,经协商也可更改上述系统界限,但应修改相应的测试项目和计算方法。

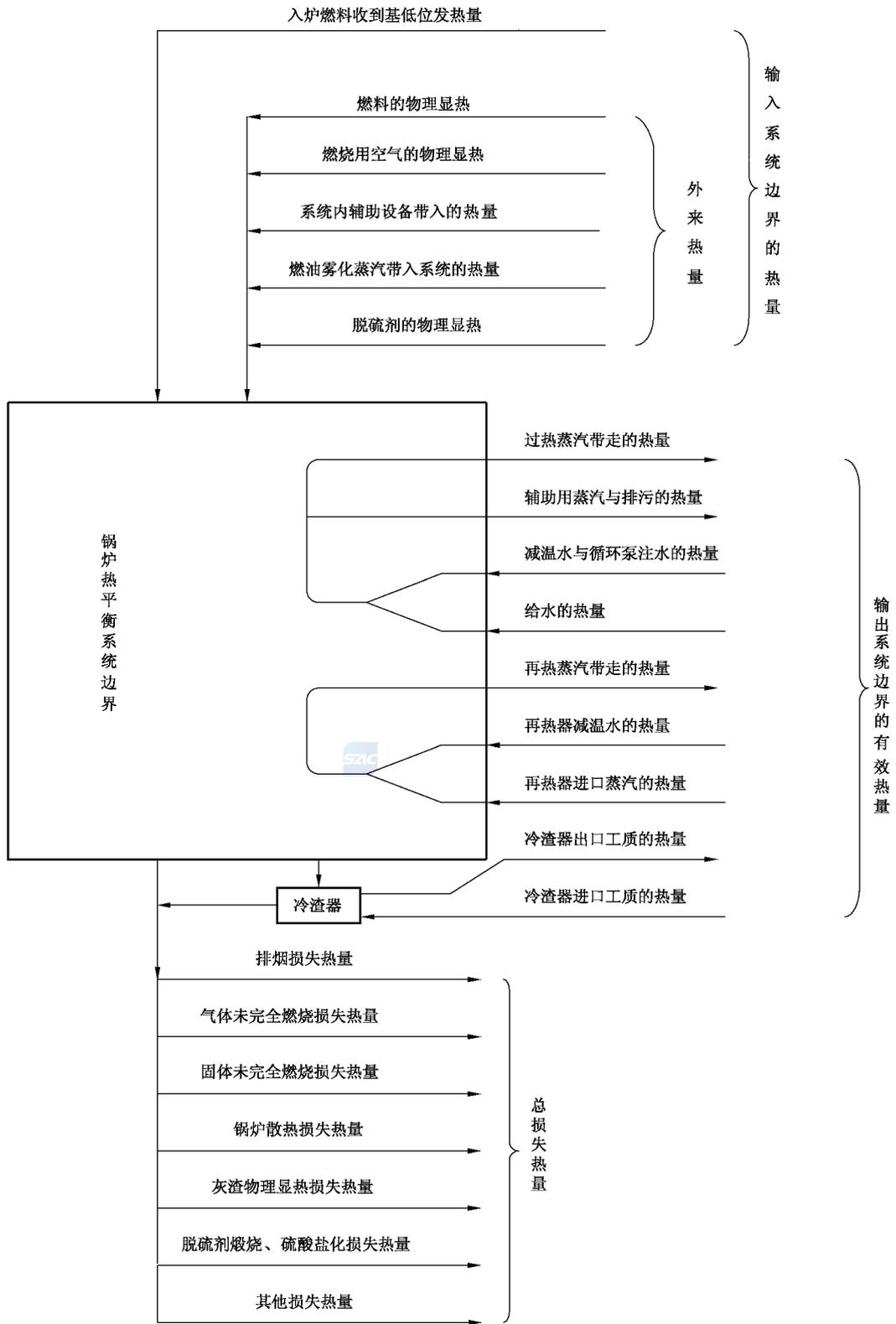


图 1 电站锅炉热量平衡图

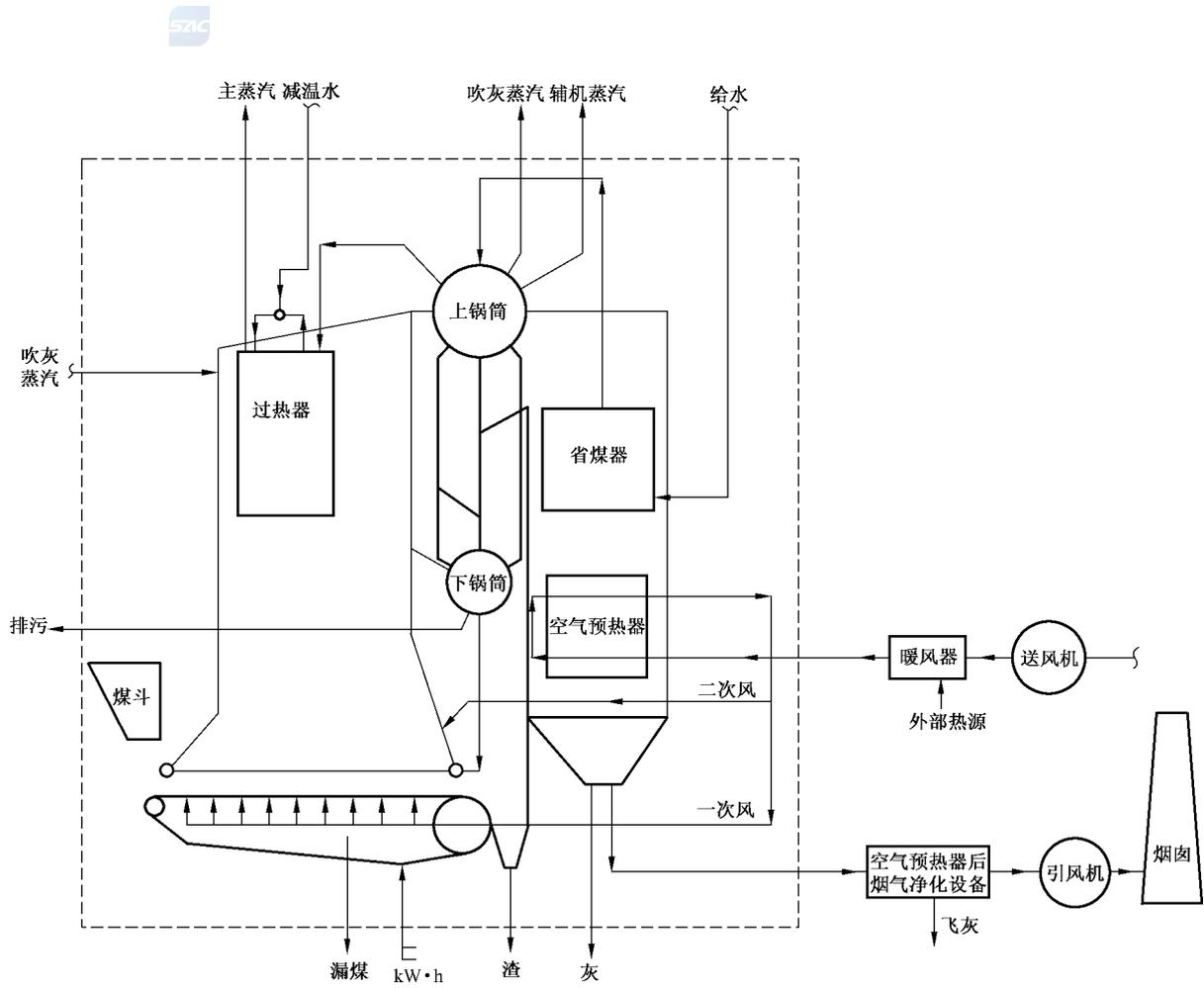


图 2 典型的火床(链条)锅炉

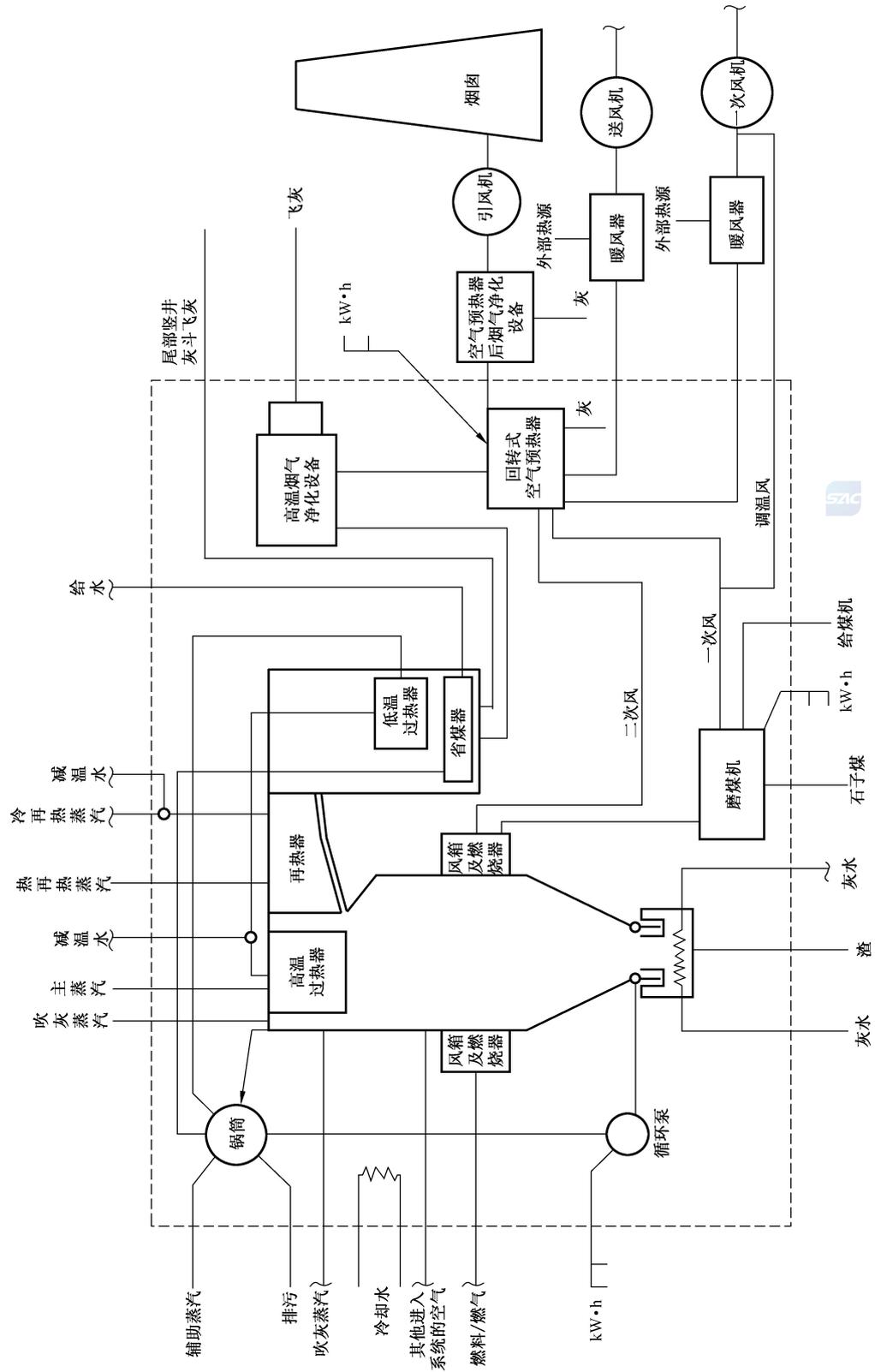


图 3 典型的煤粉锅炉

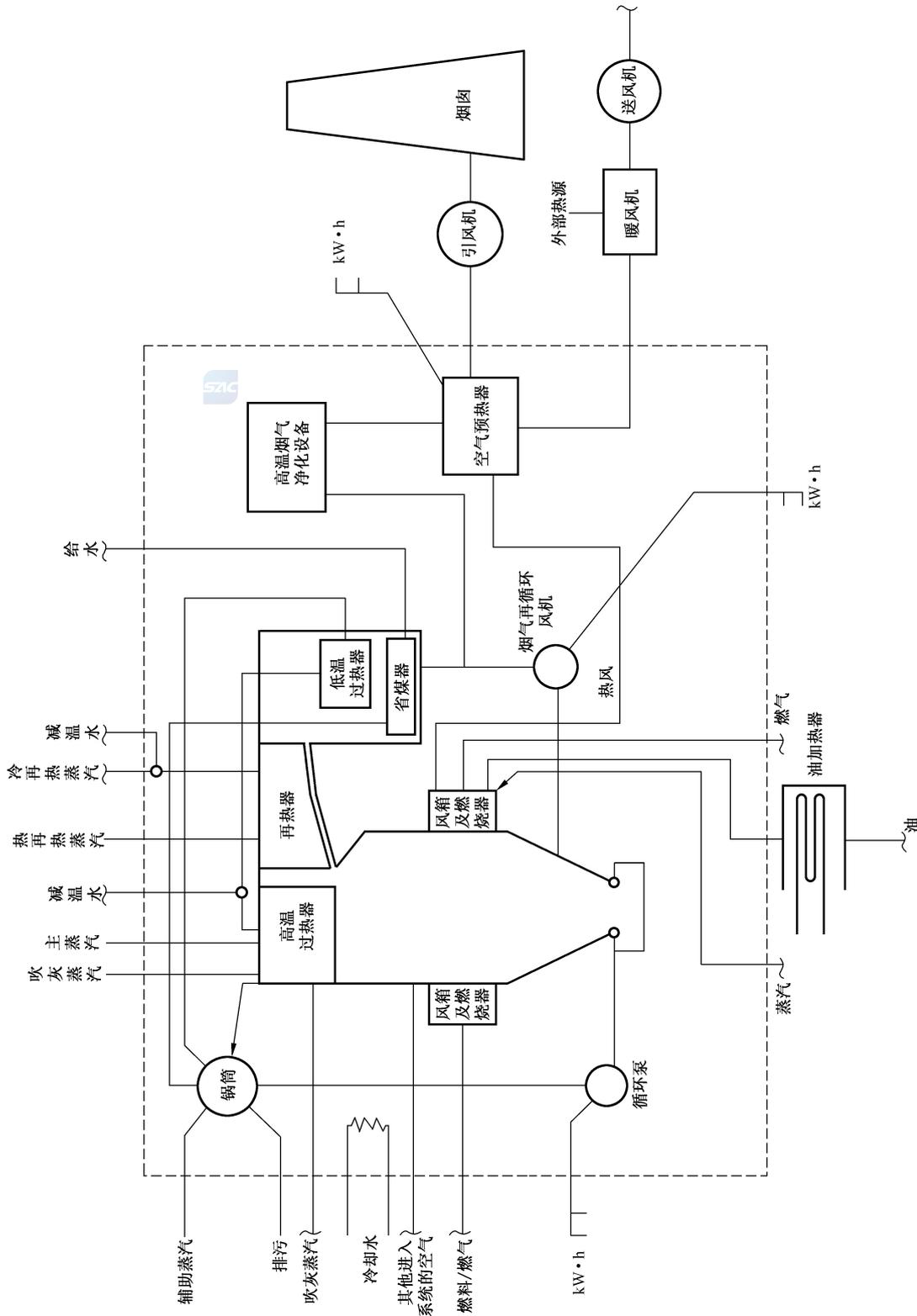


图 4 典型的燃油、燃气锅炉

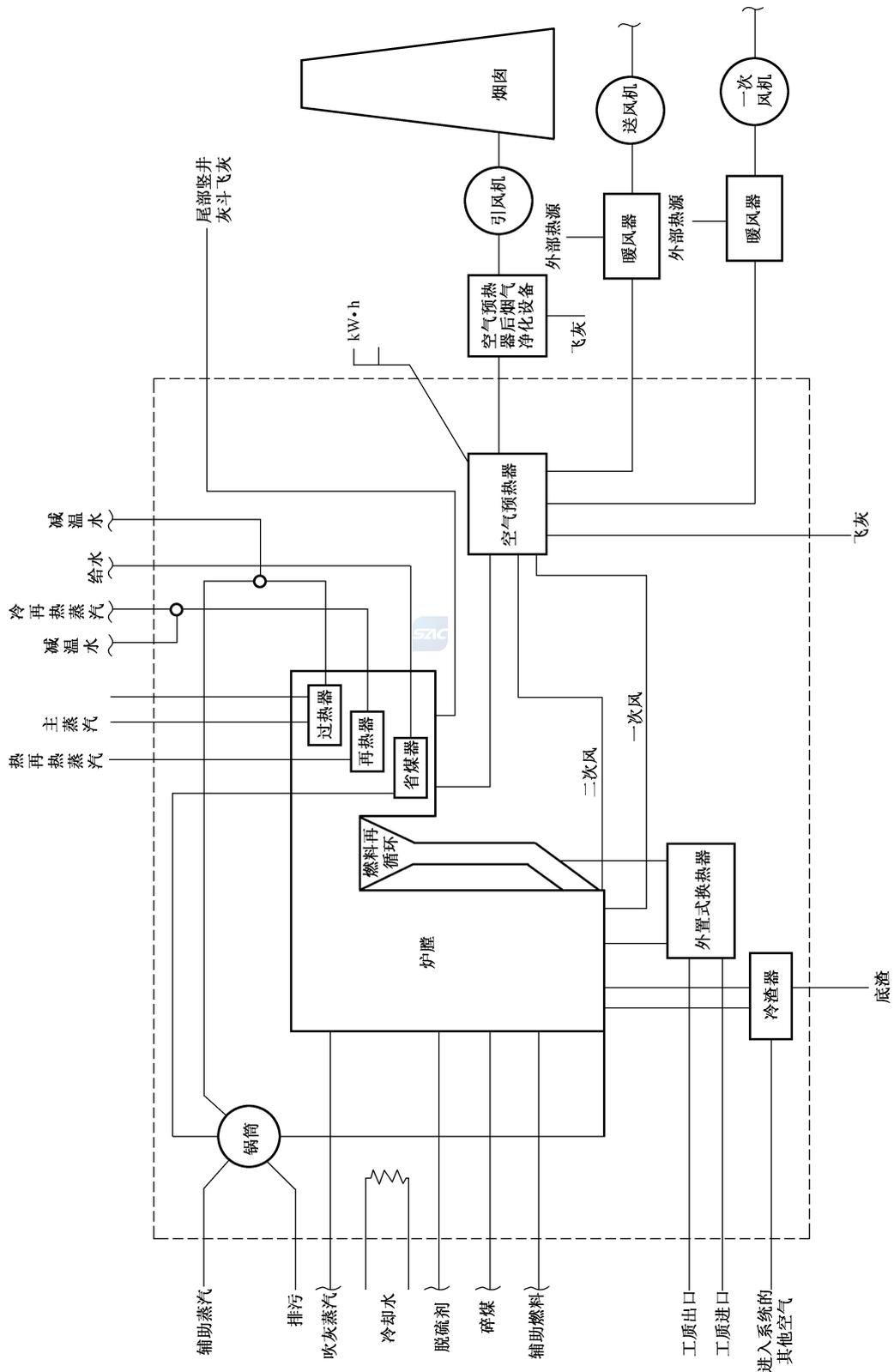


图 5 典型的循环流化床锅炉

4.3 试验前应达成的协议

试验前应达成协议的内容如下：

- a) 试验目的与试验项目；
- b) 试验单位职责范围；
- c) 试验燃料特性及其允许变化范围；
- d) 脱硫剂特性及其允许变化范围；
- e) 试验项目的测试和计算方法；
- f) 锅炉效率计算中，不测量项目的热损失给定值；
- g) 试验测试项目、测点位置及数量；
- h) 燃料、脱硫剂、飞灰、炉渣、烟气、汽、水等的取样方法及进行有关分析的实验室；
- i) 试验用仪器及其技术参数和检定单位；
- j) 设备状态及试验期间的运行方式，包括辅助设备和控制系统的投运方式；
- k) 试验期间锅炉主要参数允许波动范围（不应超过表 3 的规定）；
- l) 测试前工况的稳定时间和测量持续时间；
- m) 特殊工况及异常情况的处理，试验数据的取舍；
- n) 试验原始记录和燃料、脱硫剂、飞灰、炉渣样的处置；
- o) 各个灰、渣收集点之间灰渣量的分配比例（灰渣百分比）或测量（计算）方法；
- p) 重复性试验工况之间的允许偏差；
- q) 将测试结果修正到保证条件下的计算方法；
- r) 当设备由不同供货（制造）单位共同提供时，对有关设备性能分担的责任；
- s) 试验原始记录的保存单位；
- t) 其他在本标准内的未尽事宜。

4.4 试验大纲

试验大纲由试验负责单位编写，并经试验各方认可，内容至少应包括：

- a) 试验目的；
- b) 试验条件及要求；
- c) 试验内容；
- d) 测试项目、仪器设备、测点布置及测试方法；
- e) 试验数据处理原则；
- f) 试验人员及组织；
- g) 试验日程及计划。

4.5 试验条件

试验前，应具备如下条件：

- a) 所有参与试验的仪表仪器应在检定或校准有效期内；
- b) 具有足够的、符合试验规定的燃料和脱硫剂；
- c) 锅炉机组无明显泄漏，主、辅机能正常运转并满足试验要求；
- d) 所有受热面在开始试验前均保持正常运行时的清洁度；
- e) 锅炉机组与其他非试验系统完成隔离。

4.6 机组稳定时间

4.6.1 试验前，机组应连续正常运行 3 d 以上。测量前锅炉在试验负荷及条件下稳定运行时间应不少

于 2 h。对于添加脱硫剂的锅炉,应在脱硫剂投入量和 SO₂ 排放浓度达到稳定后 2 h,方可开始试验。

4.6.2 测试过程中,锅炉蒸发量及蒸汽参数的最大允许波动范围见表 3。

表 3 锅炉蒸汽参数最大允许波动范围

测量项目		最大允许波动范围
蒸发量 D	$D > 2\,008\text{ t/h}$	$\pm 1.0\%$
	$950\text{ t/h} < D \leq 2\,008\text{ t/h}$	$\pm 2.0\%$
	$480\text{ t/h} < D \leq 950\text{ t/h}$	$\pm 4.0\%$
	$D < 480\text{ t/h}$	$\pm 5.0\%$
蒸汽压力 P	$P > 18.5\text{ MPa}$	$\pm 1.0\%$
	$9.8\text{ MPa} \leq P \leq 18.5\text{ MPa}$	$\pm 2.0\%$
	$P < 9.8\text{ MPa}$	$\pm 4.0\%$
蒸汽温度 t	$t \geq 540\text{ }^\circ\text{C}$	$\pm 5\text{ }^\circ\text{C}$
	$t < 540\text{ }^\circ\text{C}$	$\pm 10\text{ }^\circ\text{C}$

4.7 预备性试验

4.7.1 预备性试验的目的如下:

- 检查锅炉机组运行状态;
- 检验测试装置和仪器;
- 培训试验人员。



4.7.2 如试验各方认为试验过程和条件满足试验大纲要求,预备性试验也可作为正式试验。

4.8 正式试验

4.8.1 鉴定和验收试验的持续时间见表 4,参数测量和样品取样时间间隔见表 5。

表 4 试验工况持续时间

燃烧方式		锅炉效率		其他项目测试时间/h
		测量方法	测试有效时间/h	
煤粉锅炉	固态排渣	热损失法 或输入-输出热量法	4	2
	液态排渣	输入-输出热量法	4	
火床炉		热损失法 或输入-输出热量法	4 6	2
循环流化床锅炉		热损失法 或输入-输出热量法	4	2
燃油锅炉和燃气锅炉		热损失法 或输入-输出热量法	2	2

表 5 参数测量和样品取样时间间隔

测量和取样对象	测量或取样时间间隔
蒸汽流量、压力、温度	5 min~15 min
给水流量、压力、温度	5 min~15 min
空气压力、温度, 烟气压力、温度	5 min~15 min
烟气成分	5 min~15 min
环境压力、温度	10 min~20 min
燃料和脱硫剂取样	30 min
飞灰	每个工况每个取样点至少取样 2 次
炉渣	15 min~30 min
积算表	试验起、止时记测 1 次; 试验中每小时记测 1 次
其他次要参数	15 min~30 min

4.8.2 大修前后等常规试验持续时间可适当调整, 但不应小于 2 h。参数测量和样品取样时间间隔参照表 5。

4.8.3 试验工况开始直至结束, 过热蒸汽流量、压力和温度, 再热蒸汽压力和温度, 给水压力和温度, 锅筒水位, 过量空气系数, 配风方式, 循环流化床锅炉床压和床温, 燃料量, 吸收剂流量, 制粉系统投运方式等, 应保持一致和稳定。

4.8.4 测试期间不允许进行干扰试验工况的任何操作, 如定期排污、吹灰、打渣及火床锅炉清炉、燃料层调整等。

4.9 试验记录

4.9.1 锅炉机组的运行状况与规定条件的任何偏离和试验期间的调整, 均应做好记录, 并注明发生的时间和见证人。

4.9.2 试验数据应全部记录于专用表格中。

4.9.3 试验记录至少应包括下列项目:

- a) 试验名称;
- b) 工况编号;
- c) 试验日期;
- d) 试验开始与结束时间;
- e) 测量时间、内容与数据;
- f) 测试仪器;
- g) 记录人、计算人及负责人。

4.10 试验工况和试验数据的舍弃

4.10.1 在试验过程中或整理试验结果时, 如果发现记测到的数据中有严重异常, 应考虑将此试验工况舍弃; 如果受影响的部分是在试验的开头或结尾, 且扣除异常情况后的有效测试时间符合表 4 要求, 则可舍弃异常部分的数据; 如有必要, 应重做该试验工况。

4.10.2 凡出现下列情况之一时, 该试验工况应作废:

- a) 试验燃料特性或吸收剂特性超出事先规定的变化范围;

- b) 蒸发量或蒸汽参数波动超出试验规定的范围；
- c) 某一个主要测量项目的试验数据有 1/3 以上出现异常或矛盾。

4.11 锅炉效率试验

4.11.1 锅炉效率试验有两种方法,即输入-输出热量法和热损失法,对于大型锅炉推荐采用热损失法。

4.11.2 进行鉴定和验收试验时,在所要求的负荷下至少应做两次试验。若两次试验结果超过预先商定的平行试验之间的允许偏差,则需要做重复性试验。直到有两次试验的结果落在允许偏差范围内,其试验结果为该两次试验的平均值。

5 测试项目、仪器和测试方法

5.1 主要测量项目

鉴定和验收试验主要测量项目见表 6。

表 6 锅炉鉴定和验收试验主要测量项目

序 号	名 称	说 明
一.	锅炉效率(含空气预热器漏风率)	
1.	输入-输出热量法:	
1)	燃料量	
2)	燃料发热量及工业分析	
3)	进入系统的燃料和空气温度	
4)	过热蒸汽、再热蒸汽及其他用途蒸汽的流量、压力和温度	
5)	给水和减温水流量、压力和温度	
6)	外来雾化蒸汽和热源的工质流量、压力和温度	
7)	泄漏与排污流量	如果存在
8)	锅筒内压力及水位	
2.	热损失法:	
1)	燃料量及脱硫剂量	
2)	燃料分析	
3)	脱硫剂分析	
4)	燃油雾化蒸汽流量、压力和温度	
5)	空气预热器进、出口烟气成分	
6)	空气预热器进、出口烟气温度	
7)	省煤器出口烟气成分	如装有高温脱硝装置时
8)	省煤器出口烟气温度	如装有高温脱硝装置时
9)	进入系统边界的燃料和空气温度	
10)	大气干、湿球温度和压力	
11)	飞灰、沉降灰和炉渣量	如果可测量

表 6 (续)

序 号	名 称	说 明
12)	飞灰、沉降灰和炉渣温度	
13)	飞灰、沉降灰和炉渣可燃物含量	
14)	飞灰、沉降灰和炉渣中钙、碳酸盐(以 CO ₂ 计)含量	
15)	石子煤量及发热量	如有需要
16)	辅助设备功率消耗	系统边界内有关设备
二.	其他试验项目	
1.	锅炉蒸汽参数(包括最大连续蒸发量、稳定燃烧最低蒸发量):	
1)	燃料量	
2)	燃料发热量及工业分析	
3)	过热蒸汽流量、压力和温度	
4)	再热器进、出口蒸汽压力和温度	
5)	给水和减温水流量、压力和温度	
6)	泄漏和排污流量	如果存在
7)	锅筒压力及水位	
2.	汽水系统压降:	
1)	过热蒸汽流量、压力和温度	
2)	再热器进、出口蒸汽压力和温度	
3)	给水流量、压力和温度	
4)	锅筒压力	
3.	风烟系统压降:	
1)	空气预热器进、出口一次风道静压	
2)	空气预热器进、出口二次风道静压	
3)	空气预热器进、出口烟道静压	
4)	其他有关的烟风道静压	如果需要
4.	蒸汽品质:	
1)	过热蒸汽中 SiO ₂ 和 Na ⁺ 浓度	
2)	给水中 SiO ₂ 和 Na ⁺ 浓度	
3)	炉水中 SiO ₂ 和 Na ⁺ 浓度	
4)	饱和蒸汽中 SiO ₂ 和 Na ⁺ 浓度	
5.	NO _x 、SO ₂ 排放浓度:	
1)	排烟中 O ₂ 含量	
2)	排烟中 NO 含量	
3)	排烟中 SO ₂ 含量	

5.2 测试仪器

- 5.2.1 鉴定和验收试验主要测试项目所用仪器为专用仪器。
- 5.2.2 测试仪器应在检定或校准合格期内。
- 5.2.3 如果运行表计达到测试要求的精度等级,并经校准合格,也可采用运行表计。
- 5.2.4 测量仪器可在试验后进行复校,如发现异常则应对所测数据进行修正或舍弃所测数据。
- 5.2.5 经试验各方协商同意,也可使用未包含在本标准规定范围的仪器。
- 5.2.6 主要测试仪器的测量误差见表7。

表7 主要测试仪器的最大允许误差

序号	测量项目		允许误差(按满量程计)/%
1	水和蒸汽	流量	±0.35
		压力	±0.25
		温度	±0.40
2	燃料量		±0.5
3	脱硫剂量		±0.5
4	空气和烟气	流量	±5.00
		压力	±0.25
		温度	±0.40
		烟气成分:	
		氧量(O ₂)	±1.0
		二氧化碳(CO ₂)	±1.0
一氧化碳(CO)	±5.0(读数的百分数)		
二氧化硫(SO ₂)	±5.0(读数的百分数)		
一氧化氮(NO)	±5.0(读数的百分数)		

5.3 温度测量

5.3.1 温度测量的一般要求如下:

- 温度测量所用测量元件见表8;
- 温度测点应选择速度与温度分布均匀的管道横截面;
- 应采取必要措施,防止温度测量仪表因受传导、对流和辐射影响致测量数据失真;
- 应根据不同的被测量对象、温度范围选用合适的热电偶(参见 GB/T 16839.1 和 GB/T 16839.2),热电偶导线不应与电源线并行放置。

表8 温度测量仪表

名称	测量对象	测温范围/°C
玻璃水银温度计	水和空气温度	0~500
热电偶温度计	水及蒸汽、燃油、燃气、空气、烟气等	-20~1800
干湿球温度计	空气	-10~50

5.3.2 蒸汽和给水温度测量的一般要求如下：

- a) 测量管道内的蒸汽和给水温度时,应采用插入式套管,套管插入深度应达到 1/3 管内径;并远离束状流区域。给水温度测点应尽可能选在靠近省煤器进口处。
- b) 当蒸汽温度成为重要测试项目时,如果条件许可,应分别从两个尽可能相互靠近的测点进行测量,该两个测点读数偏差应不超过其平均值的 ± 0.25 。

注:饱和蒸汽温度可根据饱和蒸汽压力由《水和蒸汽的性质》查得。

5.3.3 烟气和空气温度测量的一般要求如下：

- a) 温度测点可布置在相应受热面的进、出口处；
- b) 测量截面应远离通道的转弯、有障碍物或变径处；
- c) 截面积较大的管道,应采用网格法测量(见附录 B)；
- d) 被测量截面速度场或温度场有一项较均匀时,可采用代表点测量(见附录 B)；
- e) 被测量截面存在明显的烟气分层流动现象时,应采用流量加权的方法计算得到该截面的温度加权平均值；
- f) 干、湿球温度测量应在避风、避热源、遮阳并靠近风机进风口处。

5.3.4 固体物流温度测量的一般要求如下：

- a) 固体物流温度通常难以测量,在试验开始前各方可协商确定采用商定值或测量值；
- b) 如需测量固体物流温度,应将测量元件插入固体物料中,为防止磨损,可采用带保护套管的热电偶温度计。

5.3.5 液体和气体燃料温度测量的一般要求如下：

- a) 燃料由外界热源加热的,在加热器后测量；
- b) 燃料由系统自身热源加热的,在加热器前测量。

5.4 压力和压差测量

5.4.1 压力和压差测量的一般要求如下：

- a) 压力和压差测量可采用单圈弹簧管压力表、U 型管压力计、电子式微压计、膜式压力计、压力和差压变送器；
- b) 压力计的最小分度应满足试验精度和对压力波动观察的要求；
- c) 选择压力计时,应使被测压力值处于其满刻度范围的 1/2~3/4 区段内(下限适用压力波动大的情况,上限适用压力变化范围小的情况)。

5.4.2 汽水系统压力和压差测量的一般要求如下：

- a) 压力测点尽量靠近相应设备进、出口,压力计及传压管应装设在不受高温、冰冻和振动干扰的部位；
- b) 应对取压点和测量仪器之间的高度差进行修正。

5.4.3 烟风道静压测量的一般要求如下：

- a) 通常在烟风道内表面平整的直段壁上垂直开孔测量,测孔应远离挡板、弯头等阻力部件及涡流区。孔径宜为 2 mm~3 mm,孔边缘不应有毛刺和倒角。
- b) 测量含空气流的静压时,测量孔应避免安装在水平管道下部,以防止堵塞。
- c) 当被测烟(风)道截面当量直径超过 600 mm 时,同一测量截面上至少应有 4 个测压孔。

5.5 流量测量

5.5.1 流量测量的一般要求如下：

- a) 通过测量介质静压、动压和温度计算流量。测量仪器见表 9。

表 9 流量测量仪器

名称	测量对象	检定或标定要求
称重箱	固体、液体	达到表 7 规定
容积箱	液体	达到表 7 规定
固体给料机	固体	标定
孔板或喷嘴	液体、蒸汽和气体	达到表 7 规定
涡流流量计	液体、气体	达到表 7 规定
皮托管	气体	不标定
笛形管、文丘利、机翼		标定
靠背式动压测量管		标定

b) 采用孔板、喷嘴、文丘利和机翼装置测量时,介质温度和压力应在测量装置上游测量。

5.5.2 蒸汽流量测量的一般要求如下:

- 过热蒸汽流量采用锅炉给水流量并考虑给水流量测量点之后至过热器出口的任何补充或抽取的流量,如连续排污、过热器减温器减温水流量、锅炉循环泵注水、锅筒水位变化等。试验期间,还应对在上述区段内可能的泄漏量进行测量和记录,并在计算过热蒸汽流量时记入。
- 当锅炉试验与汽轮机试验同步进行时,可直接采用汽轮机试验所得的主蒸汽流量。
- 再热蒸汽流量可以用过热蒸汽流量减去相应的抽汽量、汽轮机高压缸漏汽量,再加上减温器减温水流量等计算得出。

5.5.3 给水和减温水流量测量的一般要求如下:

- 给水和减温水流量采用孔板或喷嘴,其检定或校准要求应符合表 7 规定。
- 为防止给水在节流件中汽化,水的压力应比水的温度实测值所对应的饱和压力高 0.25 MPa,或水的实测温度应比测量的压力所对应的饱和温度低 15 °C。

5.5.4 烟气和空气流量测量的一般要求如下:

- 推荐采用的流量测量装置见表 9,测量点的确定见附录 B。
- 测量动压的同时,应测量大气压力及管道内气流的静压和温度。对于烟气,还需同时分析烟气中各种主要成分的体积浓度,以计算烟气密度。常用气体浓度单位换算见附录 C。
- 测量动压时,测量管动压测孔应正对气流的来流方向。
- 测量烟气和空气流量时,测量截面前、后直管段长度要求推荐值见表 10。

表 10 测量截面前、后直管段的推荐值

名称	靠背式测量管	笛形管
测量截面前(上游)直管段长度 L_1	$L_1 = (8 \sim 10)d$	$L_1 \geq 6d$
测量截面后(下游)直管段长度 L_2	$L_2 = (1 \sim 3)d$	$L_2 \geq 3d$
注: d 为管道当量直径。		

5.6 燃料量和脱硫剂量

燃料量和脱硫剂量测量的一般要求如下:

- 燃料和脱硫剂自测量处至进入锅炉机组之间应尽量消除漏泄。如不可避免,则将所有漏泄或

损失量收集、称量和记录,以对测量结果进行修正。

- b) 采用运行测量装置测量燃料量和脱硫剂流量,在试验开始前应对测量装置进行校准或标定。
- c) 测量气体燃料量时,应同时测量气体燃料的压力和温度,将流量值换算到标准状态。
- d) 当已知锅炉效率时,可以通过计算的方法得到燃料量。

5.7 燃料和脱硫剂取样

5.7.1 燃料和脱硫剂取样的一般要求如下:

- a) 固体燃料和脱硫剂取样开始和结束的时间应视物料从采取点至炉膛所需的时间适当提前。
- b) 应从流动的固体物料流中取样,如果给料口不止一个,则应在每个给料口等时间间隔分别取样。每个给料口每次获取的试样质量不小于 2 kg。如果各给料口给料量不同或给料品种不同,应按照各给料口的流量进行加权混合缩制,使最终的混合试样能代表试验期间燃料的平均特性。
- c) 取样完成后,应将各取样点取得的全部份样充分混合,对固体燃料和脱硫剂,按照“堆锥四分法”(见 GB 474)缩制成预先确定的份数,每份试样不小于 5 kg,且应立即密封保存,并尽快送实验室分析。
- d) 对于混合燃料,应将不同种燃料分别缩制成平行试样,分别分析其成分,最后根据取样点的流量,采用流量加权的方法,计算混合燃料的化学成分和低位发热量。

5.7.2 煤粉取样的一般要求如下:

- a) 对直吹式制粉系统,在一次风管垂直管道上等速取样,取样孔及取样点的确定方法见附录 B。
- b) 对中间储仓式制粉系统,可在细粉分离器下粉管用活动取样管取样。
- c) 煤粉细度分析按 DL/T 567.5 的规定。

5.7.3 液体燃料取样的一般要求如下:

- a) 取样前,应将取样管道中残留的液体燃料放掉,以保证取到的样品为本次试验所用的燃料。
- b) 液体燃料取样按 GB/T 4756 的规定。
- c) 液体燃料的总取样量不小于 8 kg。

5.7.4 气体燃料取样的一般要求如下:

- a) 整个试验过程中应按均等时间间隔、等体积取样。
- b) 取样前应对取样管路进行排放冲洗。
- c) 气体燃料的总取样量应不少于 20 L。

5.8 燃料和脱硫剂分析

5.8.1 鉴定和验收试验样品分析应由有资质的实验室承担。

5.8.2 固体燃料的分析内容主要包括:低位发热量、工业分析、元素分析、煤粉细度和灰熔点,相关名词解释见 GB/T 3715,分析方法分别见 GB/T 213、GB/T 212、GB/T 476、GB/T 483、GB/T 214 和 GB/T 218。

5.8.3 液体燃料至少要分析燃料的低位发热量和元素分析,此外,视需要还可分析其重度、运动黏度系数等。分析方法见 DL/T 567.8 和 DL/T 567.9。

5.8.4 气体燃料至少需要分析燃料各种气体组分的容积百分率,按 7.2.1 计算出燃料的低位发热量。分析方法见 GB/T 10410 和 GB/T 13610。

5.8.5 混合燃料应分别进行分析,然后按 7.2.1 混合燃料热值计算方法计算出混合燃料的元素分析值和工业分析值。

5.8.6 脱硫剂分析内容包括:CaCO₃、MgCO₃ 含量,水分和杂质含量,分析方法见 GB/T 3286.8、GB/T 3286.9 和 GB/T 6284。如果有必要还应分析脱硫剂的粒径分布。

5.9 灰、渣测量和取样分析

5.9.1 灰、渣量测量的一般要求如下：

- a) 火床炉的灰量包括炉渣、飞灰和漏煤。火床炉试验时应收集试验期间全部漏煤并称量。
- b) 煤粉锅炉总的灰、渣量等于炉渣量、沉降灰量和进入除尘器的飞灰量之和。有条件时，可分别测量锅炉机组各部位排出的灰、渣量，由此计算出各部分的质量比例，用于锅炉效率计算。也可根据附录 D 确定各部分灰、渣比例，或根据试验开始前商定的灰、渣比例进行计算。
- c) 对有飞灰回燃系统的机组，应根据该系统的具体布置选定取样点及确定灰、渣比例。必要时应测量和计算确定灰、渣比例。

5.9.2 炉渣取样要求如下：

- a) 炉渣取样应尽可能从流渣中按等时间间隔、等质量接取。如果从渣槽(池、斗)内掏取，应特别注意样品的代表性，每次取样量应相同，取样方法见 DL/T 567.3。
- b) 每次取样量一般不应少于 2 kg，取样开始和结束的时间应考虑燃料从取样点到形成炉渣的滞后时间。
- c) 全部样品被破碎到粒度小于 25 mm，充分混合后，缩制成预先约定的份数，每份试样不小于 1kg。

5.9.3 灰取样要求如下：

- a) 沉降灰取样可用数个固定式取样器在集灰斗或落灰管中连续收集。
- b) 飞灰取样一般在尾部烟道合适部位，尽可能在垂直烟道气流稳定处，且取样截面、后应有适当长的直管段，取样方法见 GB/T 16157。
- c) 鉴定和验收试验应按网格法(见附录 B)进行多点等速取样。
- d) 对于常规性试验可采用代表点取样。当烟道宽度小于 10 m 时，每个烟道布置 2 个测点；当烟道宽度超过 10 m 时，应均匀布置 3 个或 4 个测点。

5.9.4 灰、渣分析方法如下：

- a) 灰、渣可燃物含量分析方法见 DL/T 567.6。
- b) 添加脱硫剂后，可通过测量灰、渣中可燃物烧失量并剔除灰、渣中碳酸盐的二氧化碳等非可燃成分确定灰、渣样品中可燃物含量，见 GB/T 218。
- c) 经试验各方协商同意，添加脱硫剂后也可按 DL/T 567.6 测量灰、渣样品中可燃物含量。

5.10 烟气取样和分析

5.10.1 烟气取样的一般要求如下：

- a) 烟气取样位置一般在空气预热器进、出口烟道截面，尽量靠近相应的烟气温度测点。对于装有高温脱硝装置的锅炉，应在高温脱硝装置进口烟道取样。
- b) 取样点位置的选取应考虑到圈梁、支撑梁对取样导管的影响，还应考虑外部作业空间。
- c) 鉴定和验收试验应采用网格法取样，见附录 B；如测量截面氧量与速度分布中有一项较均匀时，也可采用多代表点取样。
- d) 用多代表点或网格法取出的各点样品，在不影响精度的前提下可混合为 1 个或 2 个样品进行分析。
- e) 当测量 SO₂ 气体浓度时，不应采用注水式多点取样混合器，且取样管道需要采用恒温伴热。

5.10.2 取样管和连接管的材料要求如下：

- a) 取样管和链接管的材料应保证在工作温度下不与样品起反应，取样管材料应保证在高温环境下的刚性。推荐的取样管和连接管材料见表 11。

表 11 取样管和连接管材料

烟气成分	取样管材料		连接管材料
	<400 °C	≥400 °C	
O ₂	碳钢	不锈钢	氟树脂、氟橡胶
CO	碳钢	不锈钢	
CO ₂	碳钢	不锈钢	
NO	碳钢	不锈钢	
SO ₂	不锈钢(保持在 130 °C 以上)	不锈钢(保持在 130 °C 以上)	聚四氟乙烯

b) 在试验前和试验中应对取样管和连接管进行检查,确保无泄漏、无堵塞。

5.10.3 推荐采用的分析仪器见表 12。

表 12 烟气分析仪器

烟气成分	测量仪器	对取样系统要求
O ₂	顺磁氧量计 氧化锆氧量计	无泄漏
CO ₂	红外吸收仪	无泄漏
CO	红外线吸收仪	取样点温度低于 CO 的催化作用温度
SO ₂	红外线吸收仪 紫外线脉冲荧光法分析仪	取样系统应加热,避免烟气中水蒸气凝结
NO _x	化学发光法分析仪 紫外线吸收仪	
H ₂	色谱仪	
C _m H _n	红外线吸收仪 色谱仪	

5.10.4 试验开始前和试验结束后,均应采用标准气体对分析仪器进行标定,以校核分析仪器的准确性。标准气体应选用具有《中华人民共和国计量器具制造许可证》厂家的产品。

6 基础计算

6.1 空气流量

空气体积流量按式(1)计算:

$$q_{v,a} = 3\,600 v_a A \dots\dots\dots (1)$$

式中:

A ——被测截面面积,单位为平方米(m²);

q_{v,a} ——空气体积流量,单位为立方米每小时(m³/h);

v_a ——被测截面空气流速,单位为米每秒(m/s),按式(2)计算:

$$v_a = k \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho_a}} \dots\dots\dots(2)$$

式中：

k ——动压测量管系数；

Δp ——动压测量管测得的动压差，单位为帕(Pa)；

ρ_a ——空气密度，单位为千克每立方米(kg/m³)，按式(3)计算：

$$\rho_a = 2.694 \rho_{a,st} \frac{p_{at} + p_a}{273 + t_a} \times 10^{-3} \dots\dots\dots(3)$$

式中：

t_a ——空气温度，单位为摄氏度(℃)；

p_{at} ——大气压力，单位为帕(Pa)；

p_a ——空气压力，单位为帕(Pa)；

$\rho_{a,st}$ ——标准状态下的空气密度，单位为千克每立方米(kg/m³)。

通常情况下，由于空气中的水分所占的比例很少，一般可忽略，标准状态下的干空气密度为1.293 kg/m³。标准状态下空气的体积流量按式(4)计算：

$$q_{v,a,st} = \frac{\rho_a q_{v,a}}{1.293} \dots\dots\dots(4)$$

式中：

$q_{v,a,st}$ ——标准状态下空气体积流量，单位为立方米每小时(m³/h)。

标准状态下空气质量流量 $q_{m,a,st}$ (单位：kg/h)按式(5)计算：

$$q_{m,a,st} = 1.293 q_{v,a,st} \dots\dots\dots(5)$$

6.2 烟气流量

通过测量计算烟气流量的方法见式(1)和式(5)，标准状态下的烟气密度 $\rho_{fg,st}$ (单位：kg/m³)按式(6)计算，其他与空气流量计算公式相同。

$$\rho_{fg,st} = 0.014\ 28\varphi_{O_2,fg} + 0.019\ 64\varphi_{CO_2,fg} + 0.012\ 50\varphi_{CO,fg} + 0.008\ 04\varphi_{wv,fg} + 0.028\ 59\varphi_{SO_2,fg} + 0.012\ 50\varphi_{N_2,fg} + 0.013\ 39\varphi_{NO,fg} \dots\dots\dots(6)$$

式中：

$\varphi_{O_2,fg}$ 、 $\varphi_{CO_2,fg}$ 、 $\varphi_{CO,fg}$ 、 $\varphi_{SO_2,fg}$ 、 $\varphi_{N_2,fg}$ 、 $\varphi_{NO,fg}$ 、 $\varphi_{wv,fg}$ ——烟气中 O₂、CO₂、CO、SO₂、N₂、NO 和水蒸气的体积分数，%，其中： $\varphi_{O_2,fg} + \varphi_{CO_2,fg} + \varphi_{CO,fg} + \varphi_{wv,fg} + \varphi_{SO_2,fg} + \varphi_{N_2,fg} + \varphi_{NO,fg} = 100\%$ 。

6.3 理论干空气量和修正的理论干空气量

固体和液体燃料的理论干空气量按式(7)计算：

$$V_{a,d,th} = 0.088\ 8w_{C,ar} + 0.033\ 3w_{S,ar} + 0.264\ 7w_{H,ar} - 0.033\ 4w_{O,ar} \dots\dots\dots(7)$$

式中：

$V_{a,d,th}$ ——理论干空气量，单位为立方米每千克(m³/kg)；

$w_{C,ar}$ 、 $w_{S,ar}$ 、 $w_{H,ar}$ 、 $w_{O,ar}$ ——分别为入炉燃料(收到基)中元素碳、硫、氢、氧的质量分数，%。

在实际燃烧中，燃料不可能完全燃烧，飞灰和炉渣中存在一些未燃尽碳，实际燃烧的碳按式(8)计算：

$$w_{c,b} = w_{C,ar} - \frac{w_{as,ar}}{100} w_{c,rs,m} \dots\dots\dots(8)$$

式中：

$w_{c,b}$ ——实际燃烧掉的碳占入炉燃料的质量分数，%；

$w_{as,ar}$ ——入炉燃料(收到基)中灰分的质量分数, %;

$w_{c,rs,m}$ ——灰渣平均可燃物的质量分数, %,按式(9)计算:

$$w_{c,rs,m} = \frac{w_s w_{c,s}}{100 - w_{c,s}} + \frac{w_{pd} w_{c,pd}}{100 - w_{c,pd}} + \frac{w_{as} w_{c,as}}{100 - w_{c,as}} \dots\dots\dots (9)$$

式中:

w_s, w_{pd}, w_{as} ——炉渣、沉降灰、飞灰占燃料总灰量的质量分数, %,见 5.9;

$w_{c,s}, w_{c,pd}, w_{c,as}$ ——炉渣、沉降灰、飞灰中可燃物的质量分数, %。

由实际燃烧的碳计算的理论干空气量称为修正的理论干空气量。修正的理论干空气量按式(10)计算:

$$V_{a,d,th,cr} = 0.0888 w_{c,b} + 0.0333 w_{s,ar} + 0.2647 w_{H,ar} - 0.0334 w_{O,ar} \dots\dots\dots (10)$$

式中:

$V_{a,d,th,cr}$ ——修正的理论干空气量,单位为立方米每千克(m^3/kg)。

气体燃料的理论干空气量按式(11)计算:

$$V_{a,d,th,g} = \frac{1}{21} \left(0.5\varphi_{CO,g} + 0.5\varphi_{H_2,g} + 1.5\varphi_{H_2S,g} + \sum \left(m + \frac{n}{4} \right) \varphi_{C_m H_n,g} - \varphi_{O_2,g} \right) \dots\dots\dots (11)$$

式中:

$V_{a,d,th,g}$ ——燃用气体燃料的理论干空气量,单位为立方米每立方米(m^3/m^3);

$\varphi_{CO,g}, \varphi_{H_2,g}, \varphi_{H_2S,g}, \varphi_{C_m H_n,g}, \varphi_{O_2,g}$ ——气体燃料中 CO、H₂、H₂S、C_mH_n、O₂ 的体积分数, %;

m, n ——C_mH_n 中碳、氢原子数。

由于气体燃料易于燃烧,故正常运行情况下,气体燃料的理论干空气量等于修正的理论干空气量。

6.4 理论干烟气量和修正的理论干烟气量

固体和液体燃料的理论干烟气量按式(12)计算:

$$V_{fg,d,th} = 1.8658 \frac{w_{C,ar}}{100} + 0.6989 \frac{w_{S,ar}}{100} + 0.79V_{a,d,th} + 0.8000 \frac{w_{N,ar}}{100} \dots\dots\dots (12)$$

式中:

$V_{fg,d,th}$ ——理论干烟气量,单位为立方米每千克(m^3/kg);

$w_{N,ar}$ ——入炉燃料(收到基)中元素氮的质量分数, %。

由实际燃烧的碳计算的干烟气量称为修正的理论干烟气量,按式(13)计算:

$$V_{fg,d,th,cr} = 1.8658 \frac{w_{c,b}}{100} + 0.6989 \frac{w_{S,ar}}{100} + 0.79V_{a,d,th,cr} + 0.8000 \frac{w_{N,ar}}{100} \dots\dots\dots (13)$$

式中:

$V_{fg,d,th,cr}$ ——修正的理论干烟气量,单位为立方米每千克(m^3/kg)。

气体燃料的理论干烟气量按式(14)计算:

$$V_{fg,d,th,g} = \frac{\varphi_{CO_2,g} + \varphi_{CO,g} + \varphi_{H_2S,g} + \sum m\varphi_{C_m H_n,g}}{100} + 0.79V_{a,d,th,g} + \frac{\varphi_{N_2,g}}{100} \dots\dots\dots (14)$$

式中:

$V_{fg,d,th,g}$ ——气体燃料的理论干烟气量,单位为立方米每立方米(m^3/m^3);

$\varphi_{\text{CO}_2, \text{g}}$ —— 气体燃料中 CO_2 的体积分数, %;
 $\varphi_{\text{N}_2, \text{g}}$ —— 气体燃料中 N_2 的体积分数, %。

6.5 过量空气系数

过量空气系数由式(15)定义:

$$\alpha = \frac{V_{\text{a,d}}}{V_{\text{a,d,th}}} \dots\dots\dots (15)$$

式中:

α —— 过量空气系数;

$V_{\text{a,d}}$ —— 实际送入炉内的干空气量, 单位为立方米每千克 (m^3/kg)。

相应于修正的理论干空气量, 提出修正的过量空气系数概念, 修正的过量空气系数由式(16)定义:

$$\alpha_{\text{cr}} = \frac{V_{\text{a,d}}}{V_{\text{a,d,th,cr}}} \dots\dots\dots (16)$$

式中:

α_{cr} —— 修正的过量空气系数。

对于燃烧固体或者液体燃料的锅炉, 通过测量烟气成分和灰、渣可燃物含量, 可计算得到修正的过量空气系数, 按式(17)计算:

$$\alpha_{\text{cr}} = \frac{21\varphi_{\text{N}_2, \text{fg,d}}}{21\varphi_{\text{N}_2, \text{fg,d}} - 79\varphi_{\text{O}_2, \text{fg,d}}} \dots\dots\dots (17)$$

式中:

$\varphi_{\text{N}_2, \text{fg,d}}$ 、 $\varphi_{\text{O}_2, \text{fg,d}}$ —— 干烟气中 N_2 、 O_2 的体积分数, %。

当 CO 等可燃气体可以忽略不计时, 修正的过量空气系数 α_{cr} 可按简化式(18)计算:

$$\alpha_{\text{cr}} = \frac{21}{21 - \varphi_{\text{O}_2, \text{fg,d}}} \dots\dots\dots (18)$$

对于气体燃料, 过量空气系数 α 和修正的过量空气系数 α_{cr} 可视为相等, 按式(17)或式(18)进行计算。

6.6 钙硫摩尔比

钙硫摩尔比按式(19)计算:

$$r_{\text{Ca/S}} = \frac{32.066}{100.086} \frac{\omega_{\text{CaCO}_3, \text{des}}}{\omega_{\text{S,ar}}} \frac{q_{\text{m,des}}}{q_{\text{m,c}}} \dots\dots\dots (19)$$

式中:

$r_{\text{Ca/S}}$ —— 钙硫摩尔比;

$\omega_{\text{CaCO}_3, \text{des}}$ —— 脱硫剂中碳酸钙的质量分数, %;

$q_{\text{m,c}}$ —— 入炉燃料的质量流量, 单位为千克每小时 (kg/h);

$q_{\text{m,des}}$ —— 入炉脱硫剂质量流量, 单位为千克每小时 (kg/h)。

6.7 炉内脱硫效率

脱硫效率按式(20)计算:

$$\eta_{\text{SO}_2} = \left(1 - \frac{32.066}{22.41} \frac{\varphi_{\text{SO}_2, \text{fg,d}}}{\omega_{\text{S,ar}}} V_{\text{fg,d}} \right) \times 100 \dots\dots\dots (20)$$

式中:

η_{SO_2} —— 添加脱硫剂后炉内脱硫效率, %;

$\varphi_{\text{SO}_2, \text{fg,d}}$ —— 干烟气中 SO_2 的体积分数, %;

$V_{\text{fg,d}}$ ——每千克燃料燃烧生成的干烟气体积(在 SO_2 含量测量位置处),单位为立方米每千克 (m^3/kg),见式(93)。

6.8 添加脱硫剂后入炉灰分

添加脱硫剂后,入炉燃料灰分由五部分组成,即入炉燃料带入的灰分、脱硫剂灰分(杂质)、未发生分解反应的碳酸钙、脱硫生成的硫酸钙和未参加脱硫反应的氧化钙。相应每千克入炉燃料的灰分质量分数按式(21)计算:

$$w_{\text{as,to,des}} = w_{\text{as,ar}} + w_{\text{as,des}} + w_{\text{CaCO}_3,\text{ud}} + w_{\text{CaSO}_4} + w_{\text{CaO}} \dots\dots\dots(21)$$

式中:

- $w_{\text{as,to,des}}$ ——添加脱硫剂后,相应每千克入炉燃料所产生的灰分质量分数,%;
 - $w_{\text{as,des}}$ ——相应每千克入炉燃料,脱硫剂灰分的质量分数,%;
 - $w_{\text{CaCO}_3,\text{ud}}$ ——相应每千克入炉燃料,脱硫剂未分解的碳酸钙的质量分数,%;
 - w_{CaSO_4} ——相应每千克入炉燃料,脱硫后生成的硫酸钙的质量分数,%;
 - w_{CaO} ——相应每千克入炉燃料,脱硫剂煅烧反应后未发生硫酸盐化反应的氧化钙质量分数,%。
- 相应每千克入炉燃料,脱硫剂灰分的质量分数按式(22)计算:

$$w_{\text{as,des}} = \frac{100.086}{32.066} \frac{w_{\text{S,ar}}}{w_{\text{CaCO}_3,\text{des}}} r_{\text{Ca/S}} w_{\text{as,des}} \dots\dots\dots(22)$$

相应每千克入炉燃料,脱硫剂未分解的碳酸钙的质量分数按式(23)计算:

$$w_{\text{CaCO}_3,\text{ud}} = \frac{100.086}{32.066} w_{\text{S,ar}} r_{\text{Ca/S}} \left(1 - \frac{\eta_{\text{CaCO}_3,\text{dec}}}{100} \right) \dots\dots\dots(23)$$

式中:

$\eta_{\text{CaCO}_3,\text{dec}}$ ——碳酸钙分解率,即脱硫剂中分解的碳酸钙占碳酸钙总量的质量分数,%。对于正常运行的锅炉一般取 98,也可根据灰、渣中氧化钙和碳酸钙的含量确定。通常将碳酸钙分解率作为脱硫剂转化率。

相应每千克入炉燃料,脱硫后生成的硫酸钙的质量分数按式(24)计算:

$$w_{\text{CaSO}_4} = \frac{136.140}{32.066} \frac{\eta_{\text{SO}_2}}{100} w_{\text{S,ar}} \dots\dots\dots(24)$$

相应每千克入炉燃料,脱硫剂煅烧反应后未发生硫酸盐化反应的氧化钙质量分数按式(25)计算:

$$w_{\text{CaO}} = \frac{56.077}{32.066} \left(r_{\text{Ca/S}} \frac{\eta_{\text{CaCO}_3,\text{dec}}}{100} - \frac{\eta_{\text{SO}_2}}{100} \right) w_{\text{S,ar}} \dots\dots\dots(25)$$

6.9 添加脱硫剂后修正的理论干空气量和修正的理论干烟气量

添加脱硫剂后实际燃烧的碳按式(26)计算:

$$w_{\text{c,b,des}} = w_{\text{C,ar}} - \frac{w_{\text{as,to,des}}}{100} w_{\text{c,rs,m}} \dots\dots\dots(26)$$

式中:

$w_{\text{c,b,des}}$ ——添加脱硫剂后实际燃烧的碳占入炉燃料的质量分数,%。
考虑实际燃烧的碳和脱硫耗氧量计算的理论干空气量称之为添加脱硫剂后修正的理论干空气量,按式(27)计算:

$$V_{\text{a,d,th,cr,des}} = 0.0888 w_{\text{c,b,des}} + 0.0333 w_{\text{S,ar}} + 0.2647 w_{\text{H,ar}} - 0.0334 w_{\text{O,ar}} + 0.0166 w_{\text{S,ar}} \frac{\eta_{\text{SO}_2}}{100} \dots\dots\dots(27)$$

式中:

$V_{\text{a,d,th,cr,des}}$ ——添加脱硫剂后修正的理论干空气量,单位为立方米每千克(m^3/kg)。

相应地,添加脱硫剂后修正的理论干烟气的量按式(28)计算:

$$V_{\text{fg,d.th,cr,des}} = 1.8658 \frac{w_{\text{c,b,des}}}{100} + 0.6989 \frac{w_{\text{S,ar}}}{100} + 0.79V_{\text{a,d.th,cr,des}} + 0.8000 \frac{w_{\text{N,ar}}}{100} + 0.6989 \left(r_{\text{Ca/S}} \frac{\eta_{\text{CaCO}_3,\text{dec}}}{100} - \frac{\eta_{\text{SO}_2}}{100} \right) \frac{w_{\text{S,ar}}}{100} \dots\dots\dots (28)$$

式中:

$V_{\text{fg,d.th,cr,des}}$ ——添加脱硫剂后修正的理论干烟气的量,单位为立方米每千克(m^3/kg)。

6.10 添加脱硫剂后过量空气系数

相应于添加脱硫剂后修正的理论空气量,提出添加脱硫剂后修正的过量空气系数概念,添加脱硫剂后修正的过量空气系数由式(29)定义:

$$\alpha_{\text{cr,des}} = \frac{V_{\text{a,d,des}}}{V_{\text{a,d.th,cr,des}}} \dots\dots\dots (29)$$

式中:

$\alpha_{\text{cr,des}}$ ——添加脱硫剂后修正的过量空气系数;

$V_{\text{a,d,des}}$ ——添加脱硫剂后的入炉干空气量,单位为立方米每千克(m^3/kg)。

对于添加脱硫剂后的锅炉效率计算,采用添加脱硫剂后的过量空气系数更为合适。添加脱硫剂后修正的过量空气系数计算见 6.5。

7 效率计算

7.1 定义式

7.1.1 锅炉热效率

锅炉热效率的计算有两种方法,即输入-输出热量法和热损失法,也称正平衡法和反平衡法。采用输入-输出热量法计算锅炉效率见式(30),采用热损失法计算锅炉效率见式(31):

$$\eta_t = \frac{Q_{\text{out}}}{Q_{\text{in}}} \times 100 \dots\dots\dots (30)$$

$$\eta_t = \left(1 - \frac{Q_{\text{loss}}}{Q_{\text{in}}} \right) \times 100 \dots\dots\dots (31)$$

式中:

η_t ——锅炉热效率,%;

Q_{in} ——输入系统边界的热量总和,单位为千焦每千克(kJ/kg)或千焦每立方米(kJ/m^3),计算方法见 7.2,其热量包括:

- 输入系统的燃料燃烧释放的热量;
- 燃料的物理显热;
- 脱硫剂的物理显热;
- 进入系统边界的空气带入的热量;
- 系统内辅助设备带入的热量;
- 燃油雾化蒸汽带入的热量。

Q_{out} ——输出系统边界的有效热量,单位为千焦每千克(kJ/kg)或千焦每立方米(kJ/m^3),计算方法见 7.3,其热量包括:

- 过热蒸汽带走的热量;

- b) 再热蒸汽带走的热量;
- c) 辅助用汽带走的热量;
- d) 排污水带走的热量;
- e) 冷渣水带走的热量。

Q_{loss} —— 锅炉总损失热量,单位为千焦每千克(kJ/kg)或千焦每立方米(kJ/m³),其热量包括:

- a) 排烟热损失热量 Q_2 ;
- b) 气体未完全燃烧损失热量 Q_3 ;
- c) 固体未完全燃烧损失热量 Q_4 ;
- d) 锅炉散热损失热量 Q_5 ;
- e) 灰、渣物理显热损失热量 Q_6 ;
- f) 其他损失热量 Q_{oth} 。

锅炉热效率热损失法表达式:

$$\eta_t = 1 - \frac{Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 + Q_{\text{oth}}}{Q_{\text{in}}} \dots\dots\dots (32)$$

或:

$$\eta_t = 100 - (q_{2,t} + q_{3,t} + q_{4,t} + q_{5,t} + q_{6,t} + q_{\text{oth},t}) \dots\dots\dots (33)$$

式中:

- $q_{2,t}$ —— 热效率计算排烟热损失, %;
- $q_{3,t}$ —— 热效率计算气体未完全燃烧热损失, %;
- $q_{4,t}$ —— 热效率计算固体未完全燃烧热损失, %;
- $q_{5,t}$ —— 热效率计算锅炉散热损失, %;
- $q_{6,t}$ —— 热效率计算灰、渣物理显热损失, %;
- $q_{\text{oth},t}$ —— 热效率计算其他热损失, %。

7.1.2 锅炉燃料效率

如无特别指明,本标准后续提到的锅炉效率均为燃料效率。

采用输入-输出热量法计算锅炉燃料效率见式(34),采用热损失法计算锅炉燃料效率见式(35):

$$\eta = \frac{Q_{\text{out}}}{Q_{\text{net,ar}}} \times 100 \dots\dots\dots (34)$$

$$\eta = \left(1 - \frac{Q_{\text{loss}} - Q_{\text{ex}}}{Q_{\text{net,ar}}} \right) \times 100 \dots\dots\dots (35)$$

式中:

- η —— 锅炉燃料效率(锅炉效率), %;
- $Q_{\text{net,ar}}$ —— 入炉燃料(收到基)低位发热量,单位为千焦每千克(kJ/kg)或千焦每立方米(kJ/m³);
- Q_{ex} —— 输入系统边界的外来热量,也就是除入炉燃料发热量以外的所有输入热量,单位为千焦每千克(kJ/kg)或千焦每立方米(kJ/m³),按式(61)或式(110)计算。

式(35)还可写成:

$$\eta = \left(1 - \frac{Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 + Q_{\text{oth}} - Q_{\text{ex}}}{Q_{\text{net,ar}}} \right) \times 100 \dots\dots\dots (36)$$

或:

$$\eta = 100 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6 + q_{\text{oth}} - q_{\text{ex}}) \dots\dots\dots (37)$$

式中：

- q_2 —— 排烟热损失，%；
- q_3 —— 气体未完全燃烧热损失，%；
- q_4 —— 固体未完全燃烧热损失，%；
- q_5 —— 锅炉散热损失，%；
- q_6 —— 灰、渣物理显热损失，%；
- q_{oth} —— 其他热损失，包括石子煤排放热损失等，%；
- q_{ex} —— 外来热量与燃料低位发热量的百分比，%。

式(37)中， q_{oth} 和 q_{ex} 对效率值影响较小，经协商， q_{oth} 可取约定值或经验值； q_{ex} 可仅考虑进入系统边界的空气所携带的热量和燃油雾化蒸汽带入的热量。

外来热量与燃料低位发热量的百分比 q_{ex} 按式(38)计算：

$$q_{\text{ex}} = \frac{Q_{\text{ex}}}{Q_{\text{net,ar}}} \times 100 \quad \dots\dots\dots (38)$$

7.2 输入热量

7.2.1 燃料发热量

对于固体和液体燃料，锅炉效率以每千克燃料量为基础进行计算，燃料发热量取实验室收到基低位发热量 $Q_{\text{net,ar}}$ 。

对于气体燃料，锅炉效率以每标准立方米燃料量为基础计算。气体燃料低位发热量按式(39)计算：

$$Q_{\text{net,g}} = 107.98\varphi_{\text{H}_2,\text{g}} + 126.36\varphi_{\text{CO,g}} + \sum (Q_{\text{net,C}_m\text{H}_n} \varphi_{\text{C}_m\text{H}_n,\text{g}}) \quad \dots\dots\dots (39)$$

式中：

- i —— 某种燃料组分；
- $Q_{\text{net,g}}$ —— 气体燃料低位发热量，单位为千焦每立方米(kJ/m³)；
- $Q_{\text{net,C}_m\text{H}_n}$ —— 碳氢化合物低位发热量，单位为千焦每立方米(kJ/m³)，可按附录 E 查取。

对燃用多种燃料的锅炉，应分别测量每种燃料消耗量及其元素分析值、工业分析值和低位发热量。混合燃料的低位发热量按各种燃料占总燃料消耗量份额的加权平均值计算，见式(40)：

$$Q_{\text{net,ar,to}} = \sum \frac{q_{\text{m},i} Q_{\text{net,ar},i}}{\sum q_{\text{m},i}} = \sum w_{\text{f},i} Q_{\text{net,ar},i} \quad \dots\dots\dots (40)$$

式中：

- $Q_{\text{net,ar,to}}$ —— 入炉混合燃料的低位发热量，单位为千焦每千克(kJ/kg)或千焦每立方米(kJ/m³)；
- $q_{\text{m},i}$ —— 某种燃料组分的消耗量，单位为千克每小时(kg/h)或立方米每小时(m³/h)；
- $Q_{\text{net,ar},i}$ —— 某种入炉燃料的低位发热量，单位为千焦每千克(kJ/kg)或千焦每立方米(kJ/m³)；
- $w_{\text{f},i}$ —— 某种燃料消耗量占总燃料消耗量的质量分数，按式(41)计算：

$$w_{\text{f},i} = \frac{q_{\text{m},i}}{\sum q_{\text{m},i}} \quad \dots\dots\dots (41)$$

当燃煤或燃油锅炉混烧气体燃料时，需先将气体燃料成分按式(42)~式(48)换算为质量分数表示的元素成分，然后按式(40)的原则计算混合燃料的元素分析值及工业分析值。

$$w_{\text{C,g}} = \frac{0.54}{\rho_{\text{g,st}}} (\varphi_{\text{CO,g}} + \varphi_{\text{CO}_2,\text{g}} + \sum m \varphi_{\text{C}_m\text{H}_n,\text{g}}) \quad \dots\dots\dots (42)$$

$$w_{\text{H,g}} = \frac{0.045}{\rho_{\text{g,st}}} (2(\varphi_{\text{H}_2,\text{g}} + \varphi_{\text{H}_2\text{S,g}}) + \sum n \varphi_{\text{C}_m\text{H}_n,\text{g}}) \quad \dots\dots\dots (43)$$

$$w_{\text{O,g}} = \frac{0.715}{\rho_{\text{g,st}}} (\varphi_{\text{CO,g}} + 2(\varphi_{\text{CO}_2,\text{g}} + \varphi_{\text{O}_2,\text{g}})) \quad \dots\dots\dots (44)$$

$$w_{N,g} = \frac{1.25}{\rho_{g,st}} \varphi_{N_2,g} \dots\dots\dots (45)$$

$$w_{S,g} = \frac{1.43}{\rho_{g,st}} \varphi_{H_2S,g} \dots\dots\dots (46)$$

$$w_{m,g} = \frac{0.8}{\rho_{g,st}} \varphi_{wv,g} \dots\dots\dots (47)$$

$$w_{as,g} = \frac{0.1}{\rho_{g,st}} \rho_{as,g} \dots\dots\dots (48)$$

式中:

- $\varphi_{wv,g}$ —— 气体燃料中水蒸气的体积分数, %;
- $w_{C,g}$ 、 $w_{H,g}$ 、 $w_{O,g}$ 、 $w_{N,g}$ 、 $w_{S,g}$ 、 $w_{wv,g}$ 、 $w_{as,g}$ —— 气体燃料中元素碳、氢、氧、氮、硫、水蒸气、灰分的质量分数, %;
- $\rho_{as,g}$ —— 气体燃料中灰的质量浓度, 单位为克每立方米(g/m^3);
- $\rho_{g,st}$ —— 标准状态下气体燃料的密度, 单位为千克每立方米(kg/m^3), 按式(49)计算:

$$\rho_{g,st} = 0.0125 \varphi_{CO_2,g} + 0.0009 \varphi_{H_2,g} + \sum (0.54m + 0.045n) \frac{\varphi_{C_m H_n,g}}{100} + 0.0152 \varphi_{H_2S,g} + 0.0196 \varphi_{CO_2,g} + 0.0125 \varphi_{N_2,g} + 0.0143 \varphi_{O_2,g} + 0.008 \varphi_{wv,g} + \frac{\rho_{as,g}}{1000} \dots\dots\dots (49)$$

7.2.2 燃料物理显热

燃料的物理显热按式(50)计算:

$$Q_f = c_f (t_f - t_{re}) \dots\dots\dots (50)$$

式中:

- Q_f —— 燃料物理显热, 单位为千焦每千克(kJ/kg)或千焦每立方米(kJ/m^3);
- c_f —— 燃料比热, 单位为千焦每千克开 $[kJ/(kg \cdot K)]$ 或千焦每立方米开 $[kJ/(m^3 \cdot K)]$, 对于固体燃料, 见附录 F;
- t_f —— 进入系统边界的燃料温度, 单位为摄氏度($^{\circ}C$);
- t_{re} —— 基准温度, 单位为摄氏度($^{\circ}C$), 本标准规定取 $25^{\circ}C$ 。

如固体燃料的温度低于 $0^{\circ}C$ 时, 输入热量中还应扣除按式(51)计算的解冻用热量 $Q_{f,im}$:

$$Q_{f,im} = 3.35 \left(w_{m,ar} - w_{m,ad} \frac{100 - w_{m,ar}}{100 - w_{m,ad}} \right) \dots\dots\dots (51)$$

式中:

- $Q_{f,im}$ —— 解冻燃料用热量, 单位为千焦每千克(kJ/kg);
- $w_{m,ar}$ —— 入炉燃料(收到基)水分质量分数, %, 在数值上等于全水分, 其测量方法见 GB/T 211;
- $w_{m,ad}$ —— 入炉燃料(空气干燥基)水分质量分数, %。

燃料基质换算参见附录 G。

燃油比热按式(52)计算:

$$c_{fo} = 1.738 + 0.003 \frac{t_f - t_{re}}{2} \dots\dots\dots (52)$$

式中:

- c_{fo} —— 燃油比热, 单位为千焦每千克开 $[kJ/(kg \cdot K)]$ 。

气体燃料定压比热容按式(53)计算:

$$c_{p,g} = \frac{1}{100} (1.298(\varphi_{CO_2,g} + \varphi_{H_2,g} + \varphi_{O_2,g} + \varphi_{N_2,g}) + 1.591(\varphi_{CH_4,g} + \varphi_{CO_2,g} +$$

$$\varphi_{\text{H}_2\text{S.g}} + \varphi_{\text{wv.g}}) + 2.094 \sum \varphi_{\text{C}_m \text{H}_n . \text{g}}) \dots\dots\dots (53)$$

式中：

$c_{\text{p.g}}$ ——气体燃料定压比热容，单位为千焦每立方米开[kJ/(m³·K)]。

7.2.3 脱硫剂的物理显热

对于添加脱硫剂的固体燃料锅炉，脱硫剂物理显热按式(54)计算：

$$Q_{\text{des}} = \frac{q_{\text{m.des}}}{q_{\text{m.f}}} c_{\text{des}} (t_{\text{des}} - t_{\text{re}}) \dots\dots\dots (54)$$

式中：

Q_{des} ——脱硫剂物理显热，单位为千焦每千克(kJ/kg)；

$q_{\text{m.f}}$ ——燃料质量流量，单位为千克每小时(kg/h)；

c_{des} ——脱硫剂比热，单位为千焦每千克开[kJ/(kg·K)]，见附录 F；

t_{des} ——进入系统边界的脱硫剂温度，单位为摄氏度(°C)。

7.2.4 进入系统边界的空气所携带的热量

进入系统边界的干空气所携带的热量按式(55)计算：

$$Q_{\text{a,d}} = \frac{q_{\text{m.a,p}}}{q_{\text{m.f}}} \left(\frac{c_{\text{p.a,p}} t_{\text{a,p}}}{\rho_{\text{a,p}}} - \frac{c_{\text{p.a,re}} t_{\text{re}}}{\rho_{\text{a,re}}} \right) + \frac{q_{\text{m.a,s}}}{q_{\text{m.f}}} \left(\frac{c_{\text{p.a,s}} t_{\text{a,s}}}{\rho_{\text{a,s}}} - \frac{c_{\text{p.a,re}} t_{\text{re}}}{\rho_{\text{a,re}}} \right) + \frac{1}{q_{\text{m.f}}} \sum q_{\text{m.a,oth}} \left(\frac{c_{\text{p.a,oth}} t_{\text{a,oth}}}{\rho_{\text{a,oth}}} - \frac{c_{\text{p.a,re}} t_{\text{re}}}{\rho_{\text{a,re}}} \right) \dots\dots\dots (55)$$

式中：

$Q_{\text{a,d}}$ ——进入系统边界的干空气所携带的热量，单位为千焦每千克(kJ/kg)；

$q_{\text{m.a,p}}$ 、 $q_{\text{m.a,s}}$ ——进入系统边界的一次风、二次风质量流量，单位为千克每小时(kg/h)；

$c_{\text{p.a,p}}$ 、 $c_{\text{p.a,s}}$ ——进入系统边界的一次风、二次风定压比热容，单位为千焦每立方米开[kJ/(m³·K)]，参见附录 E；

$t_{\text{a,p}}$ 、 $t_{\text{a,s}}$ ——进入系统边界的一次风、二次风温度，单位为摄氏度(°C)；

$\rho_{\text{a,p}}$ 、 $\rho_{\text{a,s}}$ ——进入系统边界的一次风、二次风密度，单位为千克每立方米(kg/m³)，按式(3)计算；

$c_{\text{p.a,re}}$ ——基准温度下空气定压比热容，单位为千焦每立方米开[kJ/(m³·K)]，参见附录 E；

$\rho_{\text{a,re}}$ ——基准温度下空气密度，单位为千克每立方米(kg/m³)，按式(3)计算；

$q_{\text{m.a,oth}}$ ——进入系统边界的(未经空气预热器)其他空气质量流量，比如进入磨煤机的调温风(部分锅炉直接取自大气)、循环流化床锅炉的高压流化风等，单位为千克每小时(kg/h)；

$c_{\text{p.a,oth}}$ ——进入系统边界的(未经空气预热器)其他空气定压比热容，单位为千焦每立方米开[kJ/(m³·K)]，参见附录 E；

$t_{\text{a,oth}}$ ——进入系统边界的(未经空气预热器)其他空气温度，单位为摄氏度(°C)；

$\rho_{\text{a,oth}}$ ——进入系统边界的(未经空气预热器)其他空气密度，单位为千克每立方米(kg/m³)，按式(3)计算。

进入系统的空气中水蒸气所携带的热量按式(56)计算：

$$Q_{\text{wv}} = 1.293 \alpha_{\text{cr}} V_{\text{a,d.th,cr}} h_{\text{a,ab}} c_{\text{p,wv}} (t_{\text{a,wv}} - t_{\text{re}}) \dots\dots\dots (56)$$

式中：

Q_{wv} ——进入系统边界的空气中水蒸气所携带的热量，单位为千焦每千克(kJ/kg)；

$c_{\text{p,wv}}$ ——按照进入系统边界的空气加权平均温度确定的水蒸气定压比热容，单位为千焦每立方米开[kJ/(m³·K)]，参见附录 E；

$h_{\text{a,ab}}$ ——空气的绝对湿度，单位为千克每千克干空气，kg/kg，按式(57)计算；

$$h_{a,ab} = 0.622 \frac{h_{a,re} p_{wv,sat}/100}{p_{at} - h_{a,re} p_{wv,sat}/100} \dots\dots\dots (57)$$

式中:

$h_{a,re}$ ——空气相对湿度,%,可通过干湿球温度计查得;

$p_{wv,sat}$ ——在大气温度的下的水蒸气饱和压力,单位为帕(Pa),在 0 °C ~ 50 °C 范围内:

$$p_{wv,sat} = 611.792 7 + 42.780 9 t_a + 1.688 3 t_a^2 + 1.207 9 \times 10^{-2} t_a^3 + 6.163 7 \times 10^{-4} t_a^4$$

$t_{a,wm}$ ——进入系统的空气加权平均温度,单位为摄氏度(°C),按式(58)计算:

$$t_{a,wm} = \frac{(q_{m,a,p} t_{a,p} + q_{m,a,s} t_{a,s} + \sum q_{m,a,oth} t_{a,oth})}{q_{m,a,p} + q_{m,a,s} + \sum q_{m,a,oth}} \dots\dots\dots (58)$$

7.2.5 系统内辅助设备带入的热量

系统边界内辅助设备包括磨煤机、烟气再循环风机、热一次风机、炉水循环泵等,系统内辅助设备带入的热量按式(59)计算:

$$Q_{aux} = \frac{3\ 600}{q_{m,f}} \sum (P_{aux} \eta_{tr,aux}) \dots\dots\dots (59)$$

式中:

Q_{aux} ——系统边界内辅助设备带入的热量,单位为千焦每千克(kJ/kg);

P_{aux} ——系统边界内辅助设备功率,单位为千瓦(kW);

$\eta_{tr,aux}$ ——系统边界内辅助设备总传动效率,%。

7.2.6 燃油雾化蒸汽带入的热量



燃油雾化蒸汽带入的热量按式(60)计算:

$$Q_{st,at} = \frac{q_{m,st,at}}{q_{m,f}} (H_{st,at,en} - H_{st,sat,re}) \dots\dots\dots (60)$$

式中:

$Q_{st,at}$ ——雾化蒸汽带入的热量,单位为千焦每千克(kJ/kg);

$q_{m,st,at}$ ——雾化蒸汽质量流量,单位为千克每小时(kg/h);

$H_{st,at,en}$ ——雾化蒸汽在进口参数下的焓,单位为千焦每千克(kJ/kg);

$H_{st,sat,re}$ ——基准温度下饱和蒸汽焓,单位为千焦每千克(kJ/kg)。

7.2.7 外来热量

外来热量按式(61)计算:

$$Q_{ex} = Q_f + Q_{des} + Q_{a,d} + Q_{wv} + Q_{aux} + Q_{st,at} \dots\dots\dots (61)$$

7.2.8 输入热量

输入系统边界的热量按式(62)计算:

$$Q_{in} = Q_{net,ar} + Q_{ex} \dots\dots\dots (62)$$

7.3 输出热量

7.3.1 过热蒸汽带走的热量

过热蒸汽带走的热量按式(63)计算:

$$Q_{\text{st,SH}} = \frac{1}{q_{\text{m,f}}} (q_{\text{m,st,SH,lv}} H_{\text{st,SH,lv}} - q_{\text{m,fw,ECO,en}} H_{\text{fw,ECO,en}} - \sum q_{\text{m,sp,dSH}} H_{\text{sp,dSH}}) \quad \dots\dots\dots (63)$$

式中：

- $Q_{\text{st,SH}}$ —— 过热蒸汽带走的热量,单位为千焦每千克(kJ/kg);
- $q_{\text{m,st,SH,lv}}$ —— 过热器出口蒸汽质量流量,单位为千克每小时(kg/h);
- $H_{\text{st,SH,lv}}$ —— 过热器出口蒸汽焓,单位为千焦每千克(kJ/kg);
- $q_{\text{m,fw,ECO,en}}$ —— 省煤器进口给水质量流量,单位为千克每小时(kg/h);
- $H_{\text{fw,ECO,en}}$ —— 省煤器进口给水焓,单位为千焦每千克(kJ/kg);
- $q_{\text{m,sp,dSH}}$ —— 过热器减温器减温水质量流量(减温水来自于省煤器进口给水流量前),单位为千克每小时(kg/h);
- $H_{\text{sp,dSH}}$ —— 过热器减温器减温水焓,单位为千焦每千克(kJ/kg)。

7.3.2 再热蒸汽带走的热量

再热蒸汽带走的热量按式(64)计算：

$$Q_{\text{st,RH}} = \frac{1}{q_{\text{m,f}}} (q_{\text{m,st,RH,lv}} H_{\text{st,RH,lv}} - q_{\text{m,st,RH,en}} H_{\text{st,RH,en}} - \sum q_{\text{m,sp,dRH}} H_{\text{sp,dRH}}) \quad \dots\dots\dots (64)$$

式中：

- $Q_{\text{st,RH}}$ —— 再热蒸汽带走的热量,单位为千焦每千克(kJ/kg);
- $q_{\text{m,st,RH,lv}}$ —— 再热器出口蒸汽质量流量,等于再热器进口蒸汽流量与各级再热器减温水流量之和,单位为千克每小时(kg/h);
- $H_{\text{st,RH,lv}}$ —— 再热器出口蒸汽焓,单位为千焦每千克(kJ/kg);
- $q_{\text{m,st,RH,en}}$ —— 再热器进口蒸汽质量流量,单位为千克每小时(kg/h),汽轮机热平衡试验计算值;
- $H_{\text{st,RH,en}}$ —— 再热器进口蒸汽焓,单位为千焦每千克(kJ/kg);
- $q_{\text{m,sp,dRH}}$ —— 再热器减温器减温水质量流量,单位为千克每小时(kg/h);
- $H_{\text{sp,dRH}}$ —— 再热器减温器减温水焓,单位为千焦每千克(kJ/kg)。

式(64)适用于一次再热机组,对于多次再热机组,应加入其余各级再热器带走的热量。

7.3.3 辅助用汽带走的热量

从锅炉机组系统边界内锅筒、过热器或再热器抽出的离开锅炉系统边界作为其他用途的辅助用汽带走的热量按式(65)计算：

$$Q_{\text{st,aux}} = \frac{q_{\text{m,st,aux}}}{q_{\text{m,f}}} (H_{\text{st,aux}} - H_{\text{fw,ECO,en}}) \quad \dots\dots\dots (65)$$

式中：

- $Q_{\text{st,aux}}$ —— 辅助用蒸汽带走的热量,单位为千焦每千克(kJ/kg);
- $q_{\text{m,st,aux}}$ —— 辅助用蒸汽质量流量,单位为千克每小时(kg/h);
- $H_{\text{st,aux}}$ —— 辅助用蒸汽焓,单位为千焦每千克(kJ/kg)。

式(65)适用于一次辅助抽汽机组,对于多次辅助抽汽机组,应根据式(64)计算方法加入其余各级抽汽带走的热量。在锅炉性能试验中,如果辅助用汽能够被隔离或采用锅炉系统边界外其他辅助汽源,则该项热量为0。

7.3.4 排污水带走的热量

排污水带走的热量按式(66)计算：

$$Q_{bd} = \frac{q_{m,bd}}{q_{m,f}} (H_{w,sat} - H_{fw,ECO,en}) \dots\dots\dots (66)$$

式中：

Q_{bd} —— 排污水带走的热量，单位为千焦每千克(kJ/kg)；

$q_{m,bd}$ —— 排污水质量流量，单位为千克每小时(kg/h)；

$H_{w,sat}$ —— 饱和水焓，单位为千焦每千克(kJ/kg)。

在锅炉性能试验中，如果锅炉连续排污和定期排污能够关闭，该项热量为0。

7.3.5 冷渣器带走的热量

对于循环流化床锅炉，冷渣器带走的热量如果被利用，按式(67)计算：

$$Q_{SC} = \frac{q_{m,cw,SC}}{q_{m,f}} (H_{cw,SC,lv} - H_{cw,SC,en}) \dots\dots\dots (67)$$

式中：

Q_{SC} —— 冷渣器带走的热量，单位为千焦每千克(kJ/kg)；

$q_{m,cw,SC}$ —— 冷渣器冷却水质量流量，单位为千克每小时(kg/h)；

$H_{cw,SC,en}$ —— 冷渣器进口冷却水焓，单位为千焦每千克(kJ/kg)；

$H_{cw,SC,lv}$ —— 冷渣器出口冷却水焓，单位为千焦每千克(kJ/kg)。

对于循环流化床锅炉，如果冷渣器带走的热量未被利用，该项热量计入热损失；对于煤粉锅炉，一般来说，该项热量不被利用。

7.3.6 输出热量

输出系统边界的热量按式(68)计算：

$$Q_{out} = Q_{st,SH} + Q_{st,RH} + Q_{st,aux} + Q_{bd} + Q_{SC} \dots\dots\dots (68)$$

7.4 锅炉各项热损失

7.4.1 排烟热损失

排烟热损失热量为离开锅炉系统边界的烟气带走的物理显热，按式(69)计算：

$$Q_2 = Q_{2,fg,d} + Q_{2,wv,fg} \dots\dots\dots (69)$$

式中：

$Q_{2,fg,d}$ —— 干烟气带走的热量，单位为千焦每千克(kJ/kg)或千焦每立方米(kJ/m³)；

$Q_{2,wv,fg}$ —— 烟气所含水蒸气带走的热量，单位为千焦每千克(kJ/kg)或千焦每立方米(kJ/m³)。

干烟气带走的热量按式(70)计算：

$$Q_{2,fg,d} = V_{fg,d,AH,lv} c_{p,fg,d} (t_{fg,AH,lv} - t_{re}) \dots\dots\dots (70)$$

式中：

$V_{fg,d,AH,lv}$ —— 每千克(标准立方米)燃料燃烧生成的空气预热器出口处的干烟气体积，单位为立方米每千克(m³/kg)或立方米每立方米(m³/m³)；

$c_{p,fg,d}$ —— 干烟气从 t_{re} 至 $t_{fg,AH,lv}$ 的定压比热容，单位为千焦每立方米开[kJ/(m³·K)]，按式(73)计算；

$t_{fg,AH,lv}$ —— 空气预热器出口烟气温度，单位为摄氏度(°C)。

对固体和液体燃料，每千克燃料燃烧生成的干烟气体积 $V_{fg,d,AH,lv}$ ，按式(71)计算：

$$V_{fg,d,AH,lv} = V_{fg,d,th,cr} + (\alpha_{cr} - 1)V_{a,d,th,cr} \dots\dots\dots (71)$$

式(71)中 $V_{fg,d,th,cr}$ 、 $V_{a,d,th,cr}$ 和 α_{cr} 计算分别见 6.3、6.4 和 6.5。

对气体燃料，每标准立方米燃料燃烧生成的干烟气体积 $V_{fg,d,AH,lv}$ ，按式(72)计算：

$$V_{\text{fg,d,AH,lv}} = V_{\text{fg,d,th,g}} + (\alpha_{\text{cr}} - 1)V_{\text{a,d,th,g}} \quad \dots\dots\dots (72)$$

式(72)中 $V_{\text{a,d,th,g}}$ 、 $V_{\text{fg,d,th,g}}$ 和 α_{cr} 计算分别见 6.3、6.4 和 6.5。

式(70)中,干烟气定压比热容 $c_{\text{p,fg,d}}$ 按式(73)计算:

$$c_{\text{p,fg,d}} = c_{\text{p,O}_2} \frac{\varphi_{\text{O}_2,\text{fg,d}}}{100} + c_{\text{p,CO}_2} \frac{\varphi_{\text{CO}_2,\text{fg,d}}}{100} + c_{\text{p,CO}} \frac{\varphi_{\text{CO,fg,d}}}{100} + c_{\text{p,N}_2} \frac{\varphi_{\text{N}_2,\text{fg,d}}}{100} + c_{\text{p,SO}_2} \frac{\varphi_{\text{SO}_2,\text{fg,d}}}{100} + c_{\text{p,NO}} \frac{\varphi_{\text{NO,fg,d}}}{100} \quad \dots\dots\dots (73)$$

式中:

$\varphi_{\text{CO}_2,\text{fg,d}}$ 、 $\varphi_{\text{CO,fg,d}}$ 、 $\varphi_{\text{NO,fg,d}}$ ——干烟气中 CO_2 、 CO 、 NO 的体积分数, %。其中: $\varphi_{\text{O}_2,\text{fg,d}} + \varphi_{\text{CO}_2,\text{fg,d}} + \varphi_{\text{CO,fg,d}} + \varphi_{\text{N}_2,\text{fg,d}} + \varphi_{\text{SO}_2,\text{fg,d}} + \varphi_{\text{NO,fg,d}} = 100\%$ 。

$c_{\text{p,O}_2}$ 、 $c_{\text{p,CO}_2}$ 、 $c_{\text{p,CO}}$ 、 $c_{\text{p,N}_2}$ 、 $c_{\text{p,SO}_2}$ 和 $c_{\text{p,NO}}$ —— O_2 、 CO_2 、 CO 、 N_2 、 SO_2 和 NO 的定压比热容,单位为千焦每立方米开[$\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$],可从附录 E 查取。

烟气中 CO_2 含量可直接测量,也可以通过计算的方法取得,参见附录 H。

与烟气中其他组分相比, CO 、 NO 和 SO_2 含量极少,在进行比热容计算中可以忽略。烟气比热容的计算可以简化为式(74):

$$c_{\text{p,fg,d}} = c_{\text{p,O}_2} \frac{\varphi_{\text{O}_2,\text{fg,d}}}{100} + c_{\text{p,CO}_2} \frac{\varphi_{\text{CO}_2,\text{fg,d}}}{100} + c_{\text{p,N}_2} \frac{\varphi_{\text{N}_2,\text{fg,d}}}{100} \quad \dots\dots\dots (74)$$

烟气所含水蒸气带走的热量按式(75)计算:

$$Q_{2,\text{wv,fg}} = V_{\text{wv,fg,AH,lv}} c_{\text{p,wv}} (t_{\text{fg,AH,lv}} - t_{\text{re}}) \quad \dots\dots\dots (75)$$

式中:

$c_{\text{p,wv}}$ ——水蒸气从 t_{re} 至 $t_{\text{fg,AH,lv}}$ 的定压比热容,单位为千焦每立方米开[$\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$],可由附录 E 中查取;

$V_{\text{wv,fg,AH,lv}}$ ——每千克(标准立方米)燃料燃烧生成的空气预热器出口处的烟气中水蒸气的体积,单位为立方米每千克(m^3/kg)或立方米每立方米(m^3/m^3),包括:

- a) 燃料中的氢燃烧产生的水蒸气;
- b) 燃料中的水分蒸发形成的水蒸气;
- c) 空气中的水分;
- d) 燃油雾化蒸气带入的水蒸气。

对于固体和液体燃料,每千克燃料燃烧生成的烟气中水蒸气的体积 $V_{\text{wv,fg,AH,lv}}$,按式(76)计算:

$$V_{\text{wv,fg,AH,lv}} = 1.24 \left(\frac{9w_{\text{H,ar}} + w_{\text{m,ar}}}{100} + 1.293\alpha_{\text{cr}} V_{\text{a,d,th,cr}} h_{\text{a,ab}} + \frac{q_{\text{m,st,at}}}{q_{\text{m,f}}} \right) \quad \dots\dots\dots (76)$$

对气体燃料,每标准立方米燃料燃烧生成的烟气中水蒸气的体积 $V_{\text{wv,fg,AH,lv}}$,按式(77)计算:

$$V_{\text{wv,fg,AH,lv}} = \frac{1}{100} \left(\varphi_{\text{H}_2,\text{g}} + \varphi_{\text{H}_2\text{S,g}} + \frac{m}{2} \varphi_{\text{C}_m\text{H}_n,\text{g}} \right) + \frac{h_{\text{g}}}{0.804} + \frac{1.293\alpha_{\text{cr}} V_{\text{a,d,th,g}} h_{\text{a,ab}}}{0.804} \quad \dots\dots\dots (77)$$

式中:

h_{g} ——气体燃料的湿度,为每标准立方米干气体燃料中含水蒸气的千克数,单位为千克每立方米(kg/m^3)。

排烟热损失按式(78)计算:

$$q_2 = \frac{Q_2}{Q_{\text{net,ar}}} \times 100 \quad \dots\dots\dots (78)$$

7.4.2 气体未完全燃烧热损失

造成气体未完全燃烧热损失的原因是由于排烟中含有未完全燃烧产物 CO、H₂、CH₄ 和 C_mH_n。气体未完全燃烧损失热量按式(79)计算:

$$Q_3 = V_{\text{fg,d,AH,lv}} (126.36\varphi_{\text{CO,fg,d}} + 358.18\varphi_{\text{CH}_4,\text{fg,d}} + 107.98\varphi_{\text{H}_2,\text{fg,d}} + 590.79\varphi_{\text{C}_m\text{H}_n,\text{fg,d}}) \quad \dots\dots\dots (79)$$

式中:

$\varphi_{\text{CH}_4,\text{fg,d}}$ 、 $\varphi_{\text{H}_2,\text{fg,d}}$ 、 $\varphi_{\text{C}_m\text{H}_n,\text{fg,d}}$ ——干烟气中 CH₄、H₂、C_mH_n 的体积分数, %。

气体未完全燃烧热损失按式(80)计算:

$$q_3 = \frac{Q_3}{Q_{\text{net,ar}}} \times 100 \quad \dots\dots\dots (80)$$

7.4.3 固体未完全燃烧热损失

固体未完全燃烧损失热量等于灰、渣中可燃物含量造成的热损失量,按式(81)计算:

$$Q_4 = 3.372 7w_{\text{as,ar}}w_{\text{c,rs,m}} \quad \dots\dots\dots (81)$$

燃油锅炉灰分很少, Q₄ 可以忽略不计。若必须计算时,其固体未完全燃烧损失热量可按式(82)计算:

$$Q_4 = 3.372 7\rho_{\text{C,fg}}V_{\text{fg,d,AH,lv}} \quad \dots\dots\dots (82)$$

式中:

$\rho_{\text{C,fg}}$ ——烟气中碳的质量浓度,单位为克每立方米(g/m³)。

固体未完全燃烧热损失按式(83)计算:

$$q_4 = \frac{Q_4}{Q_{\text{net,ar}}} \times 100 \quad \dots\dots\dots (83)$$

对于燃气锅炉, q₄ = 0。

7.4.4 锅炉散热损失

锅炉散热损失热量 Q₅,系指锅炉系统边界内炉墙、辅机设备及锅炉边界内管道(烟风道及汽、水管道及联箱等)向四周环境中散失的热量。散热损失大小与锅炉机组的热负荷、外表面温度、风速有关。锅炉散热损失 q₅ 可以采用以下方法确定:

- a) 当全部被测区域表面平均温度符合以下规定时,可取用锅炉设计的散热损失值:
 - 1) 环境温度低于 27 °C 时,保温结构的外表面温度小于或等于 50 °C;
 - 2) 环境温度超过 27 °C 时,保温结构的外表面温度小于或等于环境温度与 25 °C 之和。
- b) 根据附录 I 查取。
- c) 按 GB/T 8174 和 GB/T 17357 实际测量。

7.4.5 灰、渣物理显热损失

灰、渣物理损失热量等于炉渣、沉降灰和飞灰排出锅炉设备时所带走的显热,按式(84)计算:

$$Q_6 = \frac{w_{\text{as,ar}}}{100} \left(\frac{w_s(t_s - t_{\text{re}})c_s}{100 - w_{\text{c,s}}} + \frac{w_{\text{pd}}(t_{\text{pd}} - t_{\text{re}})c_{\text{pd}}}{100 - w_{\text{c,pd}}} + \frac{w_{\text{as}}(t_{\text{as}} - t_{\text{re}})c_{\text{as}}}{100 - w_{\text{c,as}}} \right) \quad \dots\dots\dots (84)$$

式中:

c_s 、 c_{pd} 、 c_{as} ——分别表示炉渣、沉降灰和飞灰的比热,单位为千焦每千克开[kJ/(kg·K)],可由附录 E 查得或由附录 F 估算;

t_s 、 t_{pd} 、 t_{as} ——炉渣温度、沉降灰温度和飞灰温度,单位为摄氏度(°C)。

沉降灰温度、飞灰温度分别取其相应位置处的烟气温度。空冷固态排渣锅炉需实测排渣温度。

当不易直接测量炉渣温度时,火床锅炉排渣温度可取 600 °C,水冷固态排渣锅炉可取 800 °C,液态排渣锅炉可取灰流动温度(FT)再加 100 °C,同时冷渣水所带走的热量不再计及。

对燃油及燃气锅炉: $Q_6=0$ 。

灰渣物理热损失按式(85)计算:

$$q_6 = \frac{Q_6}{Q_{\text{net,ar}}} \times 100 \quad \dots\dots\dots (85)$$

7.4.6 其他热损失

其他损失热量 Q_{oth} (单位:kJ/kg)按式(86)计算:

$$Q_{\text{oth}} = Q_{\text{pr}} + Q_{\text{cw}} \quad \dots\dots\dots (86)$$

式中:

Q_{pr} ——石子煤带走的热量,单位为千焦每千克(kJ/kg);

Q_{cw} ——冷却水带走的热量,单位为千焦每千克(kJ/kg)。

中速磨煤机排出石子煤的热量 Q_{pr} (单位:kJ/kg)按式(87)计算:

$$Q_{\text{pr}} = \frac{q_{\text{m,pr}} Q_{\text{net,pr}}}{q_{\text{m,f}}} \quad \dots\dots\dots (87)$$

式中:

$Q_{\text{net,pr}}$ ——石子煤低位发热量,单位为千焦每千克(kJ/kg);

$q_{\text{m,pr}}$ ——中速磨煤机排出的石子煤的质量流量,单位为千克每小时(kg/h)。

对火床锅炉漏煤造成的热量损失,仍按式(86)计算,只是将其中的石子煤量和石子煤的低位发热量改为链条漏煤量和入炉煤的低位发热量即可。

如果存在进入锅炉系统边界的冷却水(比如循环水泵电机冷却水等),吸收的热量未被利用,其带走的热量 Q_{cw} (单位:kJ/kg)按式(88)计算:

$$Q_{\text{cw}} = \frac{q_{\text{m,cw}}}{q_{\text{m,f}}} (H_{\text{cw,lv}} - H_{\text{cw,en}}) \quad \dots\dots\dots (88)$$

式中:

$q_{\text{m,cw}}$ ——进入锅炉系统边界的冷却水质量流量,单位为千克每小时(kg/h);

$H_{\text{cw,en}}$ ——冷却设备进口冷却水焓,单位为千焦每千克(kJ/kg);

$H_{\text{cw,lv}}$ ——冷却设备出口冷却水焓,单位为千焦每千克(kJ/kg)。

其他热损失 q_{oth} 按式(89)计算:

$$q_{\text{oth}} = \frac{Q_{\text{oth}}}{Q_{\text{net,ar}}} \times 100 \quad \dots\dots\dots (89)$$

7.5 添加脱硫剂后锅炉效率

7.5.1 锅炉效率

送入炉膛的脱硫剂(CaCO_3)首先发生煅烧反应,除少量脱硫剂未发生煅烧反应外,绝大部分脱硫剂分解为 CaO 和 CO_2 ,煅烧反应为吸热反应。部分 CaO 与烟气中 SO_2 发生硫酸盐化反应生成 CaSO_4 ,同时要消耗掉烟气中的部分 O_2 ,硫酸盐化反应为放热反应。煅烧反应和硫酸盐化反应的总和称为脱硫反应。

脱硫剂通过以下几种途径影响锅炉效率:

- a) 增加灰渣质量和灰渣显热损失;



- b) 增加燃烧所需空气量,改变烟气组成和烟气量;
- c) 煨烧吸热反应和硫酸盐化放热反应改变热损失。

试验中,如果灰、渣量不易测量,试验开始前应由试验各方协商,就各测量点的灰、渣比例达成一致。添加脱硫剂后锅炉效率按式(90)或式(91)计算:

$$\eta_{des} = \left(1 - \frac{Q_{2,des} + Q_{3,des} + Q_{4,des} + Q_{5,des} + Q_{6,des} + Q_{7,des} + Q_{oth,des} - Q_{ex}}{Q_{net,ar}} \right) \times 100 \dots\dots (90)$$

式中:

- η_{des} —— 添加脱硫剂后锅炉效率, %;
- $Q_{2,des}$ —— 添加脱硫剂后每千克燃料产生的排烟损失热量,单位为千焦每千克(kJ/kg);
- $Q_{3,des}$ —— 添加脱硫剂后每千克燃料产生的气体未完全燃烧损失热量,单位为千焦每千克(kJ/kg);
- $Q_{4,des}$ —— 添加脱硫剂后每千克燃料产生的固体未完全燃烧损失热量,单位为千焦每千克(kJ/kg);
- $Q_{5,des}$ —— 添加脱硫剂后每千克燃料产生的锅炉散热损失热量,单位为千焦每千克(kJ/kg);
- $Q_{6,des}$ —— 添加脱硫剂后每千克燃料产生的灰渣物理显热损失热量,单位为千焦每千克(kJ/kg);
- $Q_{7,des}$ —— 相应每千克燃料的脱硫损失热量,单位为千焦每千克(kJ/kg);
- $Q_{oth,des}$ —— 添加脱硫剂后每千克燃料除 $Q_{2,des} \sim Q_{7,des}$ 以外的锅炉其他损失热量,单位为千焦每千克(kJ/kg)。

$$\eta_{des} = 100 - (q_{2,des} + q_{3,des} + q_{4,des} + q_{5,des} + q_{6,des} + q_{7,des} + q_{oth,des} - q_{ex}) \dots\dots\dots (91)$$

式中:

- $q_{2,des}$ —— 添加脱硫剂后排烟热损失, %;
- $q_{3,des}$ —— 添加脱硫剂后气体未完全燃烧热损失, %;
- $q_{4,des}$ —— 添加脱硫剂后固体未完全燃烧热损失, %;
- $q_{5,des}$ —— 添加脱硫剂后锅炉散热损失, %;
- $q_{6,des}$ —— 添加脱硫剂后灰渣物理显热损失, %;
- $q_{7,des}$ —— 添加脱硫剂后脱硫热损失, %;
- $q_{oth,des}$ —— 添加脱硫剂后除 $q_{2,des} \sim q_{7,des}$ 以外的其他热损失, %。

7.5.2 排烟热损失

每千克燃料产生的排烟热损失热量 $Q_{2,des}$ 按式(69)计算。

干烟气带走的热量按式(92)计算:

$$Q_{2,fg,d} = V_{fg,d,AH,lv,des} C_{p,fg,d} (t_{fg,AH,lv} - t_{re}) \dots\dots\dots (92)$$

式中:

$V_{fg,d,AH,lv,des}$ —— 添加脱硫剂后每千克燃料燃烧生成的空气预热器出口处的干烟气体积,单位为立方米每千克(m^3/kg),按式(93)计算:

$$V_{fg,d,AH,lv,des} = V_{fg,d,th,cr,des} + (\alpha_{cr,des} - 1)V_{a,d,th,cr,des} \dots\dots\dots (93)$$

式中: $V_{a,d,th,cr,des}$ 、 $V_{fg,d,th,cr,des}$ 计算见 6.9, $\alpha_{cr,des}$ 计算见 6.5 和 6.10。

烟气中水蒸气带走的热量按式(94)计算:

$$Q_{2,wv,fg} = V_{wv,fg,AH,lv,des} C_{p,wv} (t_{fg,AH,lv} - t_{re}) \dots\dots\dots (94)$$

式中:

$V_{wv,fg,AH,lv,des}$ —— 添加脱硫剂后每千克燃料燃烧生成的空气预热器出口处的烟气中水蒸气体积,单位为立方米每千克(m^3/kg),包括:

- a) 燃料中的氢燃烧生成的水蒸气;
- b) 燃料中的水分蒸发形成的水蒸气;

- c) 空气中的水分；
- d) 脱硫剂中的水分。

添加脱硫剂后每千克燃料燃烧生成的空气预热器出口处的烟气中水蒸气的体积 $V_{\text{wv.fg,AH.lv.des}}$ (单位： m^3/kg)，按式(95)计算：

$$V_{\text{wv.fg,AH.lv.des}} = 1.24 \left(\frac{9\tau\omega_{\text{H,ar}} + \omega_{\text{m,ar}}}{100} + 1.293\alpha_{\text{cr.des}} V_{\text{a,d,th.des}} h_{\text{a,ab}} + \frac{100}{32} \frac{\omega_{\text{S,ar}}}{\omega_{\text{CaCO}_3,\text{des}}} r_{\text{Ca/S}} \omega_{\text{m,des}} \right) \dots\dots\dots (95)$$

式中：

$\omega_{\text{m,des}}$ ——脱硫剂中水分质量分数，%；

$r_{\text{Ca/S}}$ 计算见 6.6。

排烟热损失按式(96)计算：

$$q_{2,\text{des}} = \frac{Q_{2,\text{des}}}{Q_{\text{net,ar}}} \times 100 \dots\dots\dots (96)$$

7.5.3 气体未完全燃烧热损失

气体未完全燃烧损失热量按式(97)计算：

$$Q_{3,\text{des}} = V_{\text{fg,d,AH.lv.des}} (126.36\varphi_{\text{CO,fg,d}} + 358.18\varphi_{\text{CH}_4,\text{fg,d}} + 107.98\varphi_{\text{H}_2,\text{fg,d}} + 590.79\varphi_{\text{C}_m\text{H}_n,\text{fg,d}}) \dots\dots\dots (97)$$

气体未完全燃烧热损失按式(98)计算：

$$q_{3,\text{des}} = \frac{Q_{3,\text{des}}}{Q_{\text{net,ar}}} \times 100 \dots\dots\dots (98)$$

7.5.4 固体未完全燃烧热损失

固体未完全燃烧损失热量等于灰、渣中可燃物含量造成的热量损失，按式(99)计算：

$$Q_{4,\text{des}} = 3.372 7m_{\text{as,to,des}} \omega_{\text{c,rs,m}} \dots\dots\dots (99)$$

式中： $\omega_{\text{c,rs,m}}$ 和 $m_{\text{as,to,des}}$ 计算分别见 6.3 和 6.8。

固体未完全燃烧热损失按式(100)计算：

$$q_{4,\text{des}} = \frac{Q_{4,\text{des}}}{Q_{\text{net,ar}}} \times 100 \dots\dots\dots (100)$$

7.5.5 锅炉散热损失

循环流化床锅炉散热损失计算和测量方法同 7.4.4，如果根据附录 I 查取，循环流化床锅炉散热损失按式(101)计算：

$$q_{5,\text{des}} = q_5 (1 + c_{\text{CFB}}) \dots\dots\dots (101)$$

式中：

c_{CFB} ——循环流化床锅炉散热面积的修正系数，取约定值。

7.5.6 灰、渣物理显热损失

灰、渣物理显热损失热量按式(102)计算：

$$Q_{6,\text{des}} = \frac{m_{\text{as,to,des}}}{100} \left(\frac{\omega_{\text{s}} (t_{\text{s}} - t_{\text{re}}) c_{\text{s}}}{100 - \omega_{\text{c,s}}} + \frac{\omega_{\text{pd}} (t_{\text{pd}} - t_{\text{re}}) c_{\text{pd}}}{100 - \omega_{\text{c,pd}}} + \frac{\omega_{\text{as}} (t_{\text{as}} - t_{\text{re}}) c_{\text{as}}}{100 - \omega_{\text{c,as}}} \right) \dots\dots\dots (102)$$

循环流化床锅炉的炉渣温度取冷渣器出口温度。如冷渣水热量未被利用，炉渣温度取冷渣器进口

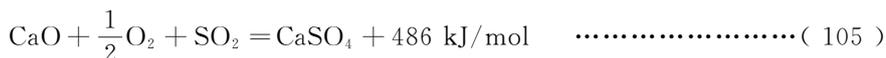
温度。

灰、渣物理显热损失按式(103)计算：

$$q_{6,\text{des}} = \frac{Q_{6,\text{des}}}{Q_{\text{net,ar}}} \times 100 \quad \dots\dots\dots(103)$$

7.5.7 脱硫热损失

添加脱硫剂后的煅烧吸热和硫酸盐化放热化学反应式分别见式(104)和式(105)：



脱硫损失热量按式(106)计算：

$$Q_{7,\text{des}} = \frac{w_{\text{S,ar}}}{100} \left(57.19r_{\text{Ca/S}}\eta_{\text{CaCO}_3,\text{dec}} - 151.59\eta_{\text{SO}_2} \right) \quad \dots\dots\dots(106)$$

脱硫热损失按式(107)计算：

$$q_{7,\text{des}} = \frac{Q_{7,\text{des}}}{Q_{\text{net,ar}}} \times 100 \quad \dots\dots\dots(107)$$

7.5.8 其他热损失

对循环流化床锅炉，如存在冷却水和冷却空气带走的热损失量，按式(108)进行计算：

$$Q_{\text{oth,des}} = \frac{q_{\text{m,cw}}}{q_{\text{m,f}}} \left(H_{\text{cw,lv}} - H_{\text{cw,en}} \right) + \frac{q_{\text{m,ca}}}{q_{\text{m,f}}} c_{\text{p,ca}} \left(t_{\text{ca,lv}} - t_{\text{ca,en}} \right) \quad \dots\dots\dots(108)$$

式中：

- $q_{\text{m,ca}}$ ——冷却空气质量流量，单位为千克每小时(kg/h)；
- $c_{\text{p,ca}}$ ——冷却空气定压比热容，单位为千焦每立方米开[kJ/(m³·K)]，参见附录 E；
- $t_{\text{ca,en}}$ ——进口冷却空气温度，单位为摄氏度(℃)；
- $t_{\text{ca,lv}}$ ——出口冷却空气温度，单位为摄氏度(℃)。

其他热损失按式(109)计算：

$$q_{\text{oth,des}} = \frac{Q_{\text{oth,des}}}{Q_{\text{net,ar}}} \times 100 \quad \dots\dots\dots(109)$$

如果配有飞灰(取自热量平衡系统边界外)再燃系统，则输入热量、有关热损失项均应做相应修改。

7.6 高温脱硝装置对锅炉效率的影响

高温脱硝装置的位置一般在锅炉省煤器出口、空气预热器进口。加装高温脱硝装置对锅炉效率的影响主要表现在四个方面：

- a) 增加了锅炉的散热损失；
- b) 还原介质(一般为氨)及其雾化空气给系统带入热量；
- c) 脱硝反应放出热量；
- d) 由于烟气成分、烟气中水分及烟气量的改变，对排烟热损失产生影响。

考虑到各种烟气成分、水分及烟气量测量和计算的复杂性，本标准建议作如下简化：

排烟中烟气成分仅考虑 O₂、CO₂、CO、NO 及 SO₂，忽略由于脱硝反应引起排烟中水分的改变，仍按

7.4.1 计算烟气量和烟气中水蒸气体积。

装有高温脱硝装置锅炉的外来热量 Q_{ex} 按式(110)计算：

$$Q_{\text{ex}} = Q_{\text{f}} + Q_{\text{des}} + Q_{\text{a,d}} + Q_{\text{wv}} + Q_{\text{aux}} + Q_{\text{st,at}} + Q_{\text{fg,DEN}} \quad \dots\dots\dots(110)$$

式中：

$Q_{fg, DEN}$ ——脱硝装置进出口烟气热量增量，即还原介质(包括脱硝反应放出的热量)及其雾化空气给系统带入热量与脱硝装置散热量之差，单位为千焦每千克(kJ/kg)，按式(111)计算：

$$Q_{fg, DEN} = V_{fg, DEN, lv} C_{p, fg, DEN, lv} t_{fg, DEN, lv} - V_{fg, DEN, en} C_{p, fg, DEN, en} t_{fg, DEN, en} \dots\dots\dots (111)$$

式中：

$V_{fg, DEN, lv}$ ——脱硝装置出口烟气体积，单位为立方米每千克(m^3/kg)，按 7.4.1 计算，过量空气系数采用离开脱硝装置的烟气成分计算；

$V_{fg, DEN, en}$ ——脱硝装置进口烟气体积，单位为立方米每千克(m^3/kg)，按 7.4.1 计算，过量空气系数采用进入脱硝装置的烟气成分计算；

$C_{p, fg, DEN, lv}$ ——脱硝装置出口烟气定压比热容，单位为千焦每立方米开[$kJ/(m^3 \cdot K)$]，按式(73)计算；

$C_{p, fg, DEN, en}$ ——脱硝装置进口烟气定压比热容，单位为千焦每立方米开[$kJ/(m^3 \cdot K)$]，按式(73)计算；

$t_{fg, DEN, lv}$ ——脱硝装置出口烟气温度，单位为摄氏度($^{\circ}C$)；

$t_{fg, DEN, en}$ ——脱硝装置进口烟气温度，单位为摄氏度($^{\circ}C$)。

7.7 换算到设计(保证)条件下的锅炉效率

7.7.1 总则

试验期间，要求进出系统边界的空气、给水、蒸汽、燃料和脱硝剂等特性参数都应符合设计或保证值要求。如它们偏离设计或保证值时，根据事先达成的协议规定，可将试验结果换算成为设计或保证条件下的结果。修正计算方法可采用本标准提供的方法，也可以按照试验前各方约定的方法。

在进行锅炉效率试验时，应尽量使试验工况接近锅炉的设计工况，减少参数的修正量。考虑到锅炉正常运行情况下，再热器进口蒸汽参数的少量变化对锅炉效率(主要是对排烟温度)影响不大，因此对再热器进口蒸汽参数的少量变化引起锅炉效率的修正不作考虑。本标准修正内容只针对锅炉的输入热量和热损失两部分，要求试验工况的过热器出口蒸汽流量、压力和温度，再热器出口蒸汽压力和温度，过量空气系数和煤粉细度等与设计参数基本保持一致，并不考虑对其修正。

如果锅炉必须在与设计值不同的过量空气系数下运行，以满足锅炉其他性能参数，例如未燃尽碳、污染物排放浓度、蒸汽温度等，则不需要对试验的过量空气系数进行修正。

7.7.2 进风温度偏离设计值的修正

进风温度的改变影响输入热量和排烟温度。

将进入系统边界的空气温度设计值替代进入系统边界的空气温度试验值，就可得到其设计条件下的外来热量。

进风温度的改变会导致排烟温度的变化，在排烟热损失及灰渣物理热损失的修正计算中，应对排烟温度进行修正。修正后的排烟温度按式(112)计算：

$$t_{fg, AH, lv, cr, a} = \frac{t_{a, AH, en, d} (t_{fg, AH, en, m} - t_{fg, AH, lv, m}) + t_{fg, AH, en, m} (t_{fg, AH, lv, m} - t_{a, AH, en, m})}{(t_{fg, AH, en, m} - t_{a, AH, en, m})} \dots\dots\dots (112)$$

式中：

$t_{fg, AH, lv, cr, a}$ ——换算到设计的(保证的)空气预热器进口空气温度下的排烟温度，单位为摄氏度($^{\circ}C$)；

$t_{a, AH, en, d}$ ——设计的(保证的)空气预热器进口空气温度，单位为摄氏度($^{\circ}C$)；

$t_{fg, AH, en, m}$ ——实测空气预热器进口烟气体温(如为双级交错布置空气预热器时，为低温级空气预热器

器),单位为摄氏度(°C);

$t_{fg,AH,lv,m}$ ——实测空气预热器出口烟气温度,单位为摄氏度(°C);

$t_{a,AH,en,m}$ ——实测空气预热器进口空气温度,单位为摄氏度(°C),按式(113)计算:

$$t_{a,AH,en,m} = \frac{(q_{m,a,p}t_{a,p} + q_{m,a,s}t_{a,s})}{q_{m,a,p} + q_{m,a,s}} \dots\dots\dots(113)$$

7.7.3 给水温度偏离设计值的修正

给水温度偏离设计值会导致排烟温度的变化。按设计给水温度修正后的排烟温度按式(114)计算:

$$t_{fg,AH,lv,cr,fw} = t_{fg,AH,lv,m} + \left(\frac{t_{fg,ECO,en} - t_{fg,ECO,lv}}{t_{fg,ECO,en} - t_{fw,m}} \right) \left(\frac{t_{fg,AH,lv} - t_{a,AH,en}}{t_{fg,AH,en} - t_{a,AH,en}} \right) (t_{fw,d} - t_{fw,m}) \dots\dots\dots(114)$$

式中:

$t_{fg,AH,lv,cr,fw}$ ——换算到设计的给水温度下的排烟温度,单位为摄氏度(°C);

$t_{fg,ECO,en}$ ——省煤器(如双级交错布置时为低温级省煤器)进口烟气温度,单位为摄氏度(°C);

$t_{fg,ECO,lv}$ ——省煤器(如双级交错布置时为低温级省煤器)出口烟气温度,单位为摄氏度(°C);

$t_{fw,m}$ ——实测的给水温度,单位为摄氏度(°C);

$t_{fw,d}$ ——设计的(保证的)给水温度,单位为摄氏度(°C)。

7.7.4 试验燃料特性偏离设计值的修正

将燃料的元素分析及低位发热量设计值替代所有热损失计算有关公式中的相应值,即可求得修正后的热损失值。

7.7.5 空气水分偏离设计值导致热损失变化的修正

将设计的空气中的水分替代测量值即可求得修正后的热损失值。

7.7.6 锅炉效率修正

用修正后的外来热量、设计燃料低位发热量及修正后的热损失,带入锅炉效率计算式中,可求得设计或保证条件下的锅炉效率。

8 其他性能试验

8.1 锅炉最大连续蒸发量

8.1.1 试验记录和测量内容如下:

- a) 蒸汽流量、压力和温度;
- b) 给水流量、压力和温度;
- c) 炉水和蒸汽品质;
- d) 减温水流量;
- e) 受热面金属管壁温度;
- f) 锅炉各辅机运行参数等。

8.1.2 如果蒸汽与给水参数偏离设计值,则应将所测得的最大蒸发量修正到设计参数。

8.2 锅炉额定蒸发量、蒸汽压力和温度

锅炉额定蒸发量、蒸汽压力和温度试验应分别在投高位磨煤机和低位磨煤机工况下进行,记录测量

内容如下：

- a) 蒸汽流量、压力和温度；
- b) 给水流量、压力和温度；
- c) 减温水流量；
- d) 受热面金属管壁温度；
- e) 锅炉各辅机运行参数等。

8.3 稳定燃烧最低蒸发量和液态排渣临界蒸发量

8.3.1 试验准备内容如下：

- a) 确认燃料特性和煤粉细度或燃料粒径；
- b) 检查和确认火检系统和灭火保护装置运行正常；
- c) 做好快速投入助燃燃料或等离子点火装置等措施；
- d) 做好机组减负荷的技术准备，包括减负荷过程中的运行方式、减负荷速率、各负荷点稳定时间等。

8.3.2 试验记录测量内容如下：

- a) 蒸汽流量、压力和温度；
- b) 给水流量、压力和温度；
- c) 减温水流量；
- d) 锅炉各辅机运行参数；
- e) 火检强度指示；
- f) 炉膛负压；
- g) 表盘氧量或床温；
- h) 流渣状况。

8.4 锅炉 NO_x 排放浓度

锅炉在燃烧过程中会生成 NO 和 NO₂，两者之和用 NO_x 表示，通常情况下 NO₂ 在 NO_x 的比率约为 5%。为简化起见，本标准中 NO_x 浓度按实测 NO 浓度除以 0.95 计。

应同时测量烟气中 NO 和 O₂ 浓度，按照 GB 13223，将 NO_x 换算到过量空气系数为 1.4 的标准浓度。换算方法见式(115)：

$$\rho_{\text{NO}_x, \text{re}} = \rho_{\text{NO}_x, \text{m}} \frac{\alpha_{\text{cr}}}{1.4} \quad \dots\dots\dots(115)$$

式中：

$\rho_{\text{NO}_x, \text{re}}$ ——换算到过量空气系数为 1.4 时的 NO_x 质量浓度，单位为毫克每立方米(mg/m³)；

$\rho_{\text{NO}_x, \text{m}}$ ——烟气中实测的 NO_x 质量浓度，单位为毫克每立方米(mg/m³)。

8.5 锅炉 SO₂ 排放浓度

应同时测量烟气中 SO₂ 和 O₂ 浓度，按照 GB 13223，将 SO₂ 的实测浓度换算到过量空气系数为 1.4 的标准浓度。换算方法见式(116)：

$$\rho_{\text{SO}_2, \text{re}} = \rho_{\text{SO}_2, \text{m}} \frac{\alpha_{\text{cr}}}{1.4} \quad \dots\dots\dots(116)$$

式中：

$\rho_{\text{SO}_2, \text{re}}$ ——换算到过量空气系数为 1.4 时的 SO₂ 质量浓度，单位为毫克每立方米(mg/m³)；

$\rho_{\text{SO}_2, \text{m}}$ ——烟气中实测的 SO₂ 质量浓度，单位为毫克每立方米(mg/m³)。

8.6 空气预热器性能

8.6.1 试验内容

空气预热器应做以下试验项目：

- a) 空气预热器烟气侧效率；
- b) 空气预热器漏风率；
- c) 空气预热器烟风道静压差。

8.6.2 试验要求

空气预热器试验要求如下：

- a) 试验工况通常为锅炉额定蒸发量工况，也可以是预先约定的工况；
- b) 试验时，煤种和过量空气系数、一次风量、空气预热器出口一、二次风热风母管压力等应与设计值一致；
- c) 应同时测量空气预热器进、出口烟气成分，试验有效分析次数不少于 8 次。

8.6.3 性能计算

空气预热器烟气侧效率按式(117)计算：

$$\eta_{\text{fg,AH}} = \frac{t_{\text{fg,AH, en,m}} - t_{\text{fg,AH, lv, nl}}}{t_{\text{fg,AH, en,m}} - t_{\text{a,AH, en,m}}} \times 100 \quad \dots\dots\dots(117)$$

式中：

- $\eta_{\text{fg,AH}}$ ——空气预热器烟气侧效率，%；
- $t_{\text{fg,AH, lv, nl}}$ ——经无空气泄漏修正的空气预热器出口烟气温度的单位为摄氏度(°C)，按式(118)计算：

$$t_{\text{fg,AH, lv, nl}} = \frac{\eta_{\text{fg,AH}} c_{\text{p,a}} (t_{\text{fg,AH, lv,m}} - t_{\text{a,AH, en,m}})}{100 c_{\text{p,fg}}} + t_{\text{fg,AH, lv,m}} \quad \dots\dots\dots(118)$$

式中：

- $\eta_{\text{fg,AH}}$ ——空气预热器漏风率，%；
- $c_{\text{p,a}}$ ——在温度 $t_{\text{a,AH, en,m}}$ 和 $t_{\text{fg,AH, lv,m}}$ 之间的空气定压比热容，单位为千焦每立方米开 [kJ/(m³·K)]；
- $c_{\text{p,fg}}$ ——在温度 $t_{\text{fg,AH, lv,m}}$ 和 $t_{\text{fg,AH, lv, nl}}$ 之间的烟气定压比热容，单位为千焦每立方米开 [kJ/(m³·K)]。

空气预热器漏风率按式(119)计算：

$$\eta_{\text{fg,AH}} = \frac{w_{\text{fg,AH, lv}} - w_{\text{fg,AH, en}}}{w_{\text{fg,AH, en}}} \times 100 \quad \dots\dots\dots(119)$$

式中：

- $w_{\text{fg,AH, en}}$ ——空气预热器进口烟气质量分数，%；
- $w_{\text{fg,AH, lv}}$ ——空气预热器出口烟气质量分数，%。

不考虑水分时，空气预热器漏风率也可以按式(120)和式(121)计算：

$$\eta_{\text{fg,AH}} = \frac{(\alpha_{\text{AH, lv, cr}} - \alpha_{\text{AH, en, cr}}) V_{\text{a, th, cr}} \rho_{\text{a, d}}}{\alpha_{\text{AH, en, cr}} V_{\text{a, th, cr}} \rho_{\text{a, d}} + (V_{\text{fg, th, cr}} \rho_{\text{fg, d}} - V_{\text{a, th, cr}} \rho_{\text{a, d}})} \times 100 \quad \dots\dots\dots(120)$$

$$\eta_{\text{fg,AH}} = \frac{\varphi_{\text{CO}_2, \text{AH, en}} \rho_{\text{fg,AH, lv}} - \varphi_{\text{CO}_2, \text{AH, lv}} \rho_{\text{fg,AH, en}}}{\varphi_{\text{CO}_2, \text{AH, lv}} \rho_{\text{fg,AH, en}}} \times 100 \quad \dots\dots\dots(121)$$

式中：

- $\alpha_{\text{AH, en, cr}}$ ——修正的空气预热器进口过量空气系数, 计算见 6.5;
 - $\alpha_{\text{AH, lv, cr}}$ ——修正的空气预热器出口过量空气系数, 计算见 6.5;
 - $\rho_{\text{a, d}}$ ——干空气密度, 单位为千克每立方米(kg/m^3), 取 1.293;
 - $\rho_{\text{fg, d}}$ ——按修正理论烟气量计算的干烟气密度, 单位为千克每立方米(kg/m^3);
 - $\varphi_{\text{CO}_2, \text{AH, en}}$ ——空气预热器进口 CO_2 体积分数, %;
 - $\varphi_{\text{CO}_2, \text{AH, lv}}$ ——空气预热器出口 CO_2 体积分数, %;
 - $\rho_{\text{fg, AH, en}}$ ——空气预热器进口烟气密度, 单位为千克每立方米(kg/m^3), 计算见 6.2;
 - $\rho_{\text{fg, AH, lv}}$ ——空气预热器出口烟气密度, 单位为千克每立方米(kg/m^3), 计算见 6.2。
- $\rho_{\text{fg, d}}$ 按式(122)计算：

$$\rho_{\text{fg, d}} = \frac{w_{\text{fg, d, th, cr}}}{V_{\text{fg, d, th, cr}}} \dots\dots\dots (122)$$

式中：

$w_{\text{fg, d, th, cr}}$ ——修正的理论干烟气质量流量分数, %, 按式(123)计算：

$$w_{\text{fg, d, th, cr}} = 3.664 \frac{w_{\text{c, b}}}{100} + 1.997 \frac{w_{\text{S, ar}}}{100} + 0.987 \frac{6V_{\text{a, th, cr}}}{100} + \frac{w_{\text{N, ar}}}{100} \dots\dots\dots (123)$$

粗略估算空气预热器漏风率时, 可以按式(124)或式(125)计算：

$$\eta_{\text{lg, AH}} = \frac{\alpha_{\text{AH, lv, cr}} - \alpha_{\text{AH, en, cr}}}{\alpha_{\text{AH, en, cr}}} \times 90 \dots\dots\dots (124)$$

$$\eta_{\text{lg, AH}} = \frac{\varphi_{\text{CO}_2, \text{AH, en}} - \varphi_{\text{CO}_2, \text{AH, lv}}}{\varphi_{\text{CO}_2, \text{AH, lv}}} \times 90 \dots\dots\dots (125)$$

空气预热器烟、风道静压差按式(126)计算：

$$\Delta p_{\text{AH}} = p_{\text{AH, lv}} - p_{\text{AH, en}} \dots\dots\dots (126)$$

式中：

- Δp_{AH} ——空气预热器进出口烟(风)道静压差, 单位为帕(Pa);
 - $p_{\text{AH, en}}$ ——空气预热器进口烟(风)道静压力, 单位为帕(Pa);
 - $p_{\text{AH, lv}}$ ——空气预热器出口烟(风)道静压力, 单位为帕(Pa)。
- 如果需要计算锅炉整体或部分烟(风)道静压差, 同样按式(126)计算。

8.7 汽水系统压降

汽水系统压降为其进、出口静压差, 可用差压计直接测量, 也可同时测量其进、出口静压, 按式(127)计算：

$$\Delta p = p_{\text{en}} - p_{\text{lv}} \dots\dots\dots (127)$$

式中：

- p_{en} ——汽水系统或管组进口静压力, 单位为兆帕(MPa);
 - p_{lv} ——汽水系统或管组出口静压力, 单位为兆帕(MPa)。
- 应考虑对传压管液柱重位压差的修正。

8.8 蒸汽品质

蒸汽品质试验要求和方法如下：

- a) 鉴定和验收试验, 蒸汽品质试验应在锅炉最大连续蒸发量试验时同步进行;
- b) 蒸汽品质试验应在锅炉给水和炉水品质合格的前提下进行, 在蒸汽品质试验的过程中应同时

监测给水和炉水的品质；

- c) 当水循环系统或汽水分离系统改变、变负荷过程中或者锅炉运行方式改变导致锅筒水位严重波动或偏斜、给水品质发生改变、过热器或汽轮机通流部分严重积盐时,应测量蒸汽品质；
- d) 锅炉给水、炉水和饱和蒸汽的合格标准见 GB/T 12145,汽、水样品的采集和分析方法见 GB/T 14416。

8.9 循环流化床锅炉脱硫效率

循环流化床锅炉脱硫效率计算见 6.7。

9 试验报告

9.1 试验背景

包括试验原因、试验的性质(鉴定、验收试验还是常规试验)、试验委托单位、试验负责单位、试验参加单位、试验总体时间等。

9.2 锅炉主辅设备介绍

锅炉简介,主辅设备技术参数、燃料特性和脱硫剂特性、运行情况及必要的图表。

9.3 试验目的

对于鉴定试验,试验目的重在检验该类型锅炉的性能指标能否达到设计值并作出综合评价;对于验收试验,试验目的重在检验锅炉运行性能能否达到设备合同中有关保证值;对于大修前后试验,试验目的重在指导大修及对大修效果进行评价;对于燃料改变后的试验,试验目的重在评估锅炉设备能否适应新的燃料及燃料改变后锅炉运行的安全性和经济性。

9.4 试验内容

包括试验项目、项目保证值或设计值及保证条件等。

9.5 测试项目、仪器设备、测点布置和测试方法

包括根据确定的测试项目、使用的仪器设备及检定(校准)单位、燃料和脱硫剂及灰(渣)化验的指定实验室、量值溯源程序、测点位置、测点数量、必要的测点安装图、取样测试方法及取样测试频率等。

9.6 试验数据整理

包括记录测量的锅炉运行参数、燃料和脱硫剂及灰(渣)的分析化验数据、测试结果和计算结果。

9.7 试验结果分析

根据试验结果、试验内容,与设计或保证值进行比较和分析,并对测试过程中遇到的问题加以说明。

9.8 结论

根据试验结果对锅炉相关性能指标做出评价。

9.9 附件

包括所有记录结果,必要时可附有原始记录、实验室化验结果、采用的测量技术及仪表的补充说明、附件等的复印件。

附录 A

(资料性附录)

常用法定计量单位及其换算

常用法定计量单位及其换算见表 A.1。



表 A.1 常用法定计量单位及其换算表

序号	量的名称	法定单位		换算及常用英制单位
		名称	符号	
1	时间	秒 分 (小)时	s min h	1 min=60 s 1 h=60 min=3 600 s
2	长度	米 分米 厘米 毫米 微米 纳米 千米、公里	m dm cm mm μm nm km	1 dm=1/10 m 1 cm=1/100 m 1 mm=1/1 000 m 1 μm =1/1 000 mm 1 nm= 10^{-6} mm 1 公里=1 000 m 1 in(英寸)=25.4 mm 1 ft=(英尺)=12 in=30.48 cm 1 yd(码)=3 ft=0.914 4 m
3	面积	平方米	m^2	1 $\text{ft}^2=0.929 \text{ m}^2$ 1 $\text{in}^2=6.451 6 \times 10^{-4} \text{ m}^2$
4	体积 容积	立方米 升 立方厘米	m^3 L cm^3	1 L=1 $\text{dm}^3=10^{-3} \text{ m}^3$ 1 $\text{cm}^3=10^{-3}$ L 1 cc=1 $\text{cm}^3=10^{-3}$ L 1 $\text{ft}^3=2.832 \times 10^{-2} \text{ m}^3=28.32$ L 1 $\text{in}^3=1.638 7 \times 10^{-5} \text{ m}^3=1.638 7 \times 10^{-2}$ L
5	质量	千克 吨 克	kg t g	1 t=1 000 kg 1 g=1/1 000 kg 1 lb(磅)=0.453 592 37 kg
6	力 重力	牛(顿) 千牛(顿)	N kN	1 kN=1 000 N 1 kgf(千克力)=9.806 5 N 1 lbf(磅力)=4.448 N
7	压力 压强 应力	帕(斯卡)	Pa	1 $\text{kgf}/\text{m}^2=9.806 65 \text{ Pa}$ 1 $\text{kgf}/\text{cm}^2=9.806 6 \times 10^4 \text{ Pa}=0.098 066 5 \text{ MPa}$ 1 $\text{kgf}/\text{mm}^2=9.806 65 \text{ MPa}$ 1 bar= 10^5 Pa 1 mmHg=133.322 Pa 1 mmH ₂ O=9.806 65 Pa 1 Torr=133.322 Pa 1 atm(标准大气压)=101 325 Pa 1 at(工程大气压)=98 066.5 Pa 1 lbf/ft^2 (磅力/英尺 ²)=47.880 3 Pa 1 lbf/in^2 (磅力/英寸 ²)=6 894.76 Pa

表 A.1 (续)

序号	量的名称	法定单位		换算及常用英制单位
		名称	符号	
8	能 功 热	焦(耳) 千瓦小时	J kW h	1 kW·h=3.6×10 ⁵ J 1 kgf·m=9.806 65 J 1 kcal=4.186 8 J 1 ft·lbf(英尺磅力)=1.355 82 J 1 Btu(英热单位)=1 055 J
9	功率	瓦特 千瓦	W kW	1 千瓦=1 kW=1 000 W 1 kgf·m/s=9.806 65 W 1 ft·lbf/s(英尺磅力每秒)=1.355 82 W 1 cal/s=4.186 8 W 1 Btu/s(英热单位每秒)=1 055 W
10	速度	米每秒	m/s	1 in/s=0.025 4 m/s 1 ft/s=0.304 8 m/s
11	加速度	米每二次方秒	m/s ²	1g _s (标准重力加速度)=9.806 65 m/s ²
12	流量	立方米每小时 升每分	m ³ /h L/min	1 L/min=0.060 00 m ³ /h 1 kg(公斤力)=9.806 5 N 1 lbf(磅力)=4.448 N
13	温度	开(尔文) 摄氏度 华氏度	K °C °F	0 °C=273.15 K 5/9(°F-32)=°C △1 °F=0.555 556 K
14	密度	千克每立方米	kg/m ³	1 lb/ft ³ (磅每立方英尺)=16.01 kg/m ³
15	发热量	焦耳每千克	J/kg	1 kcal/kg=4 187 J/kg 1 Btu/lb(英热单位每磅)=2 326.13 J/kg
16	容积热强度	瓦特每立方米	W/m ³	1 kcal/(m ³ ·h)=1.163 W/m ³ 1 Btu/(ft ³ ·h)=10.347 W/m ³
17	面积热强度	瓦特每平方米	W/m ²	1 kcal/(m ² ·h)=1.163 W/m ² 1 Btu/(ft ² ·h)=3.154 W/m ²
18	比热	焦耳每千克 开(尔文)	J/(kg·K)	1 kcal/(kg·°C)=4 187 J/(kg·K) 1 Btu/(lb·°F)=1 kcal/(kg·°C) =4 187 J/(kg·K)
19	浓度	克每升 毫克每升 毫克每立方米	g/L mg/L mg/m ³	1 g/L=1 kg/m ³
20	传热系数	焦耳每平方米 开(尔文)	W/(m ² ·K)	1 kcal/(m ² ·h·°C)=1.163 W/(m ² ·K) 1 Btu/(ft ² ·h·°F)=4.882 kcal/(m ² ·h·°C) =5.678 W/(m ² ·K)
21	热导率 (导热系数)	瓦特每米开 (尔文)	W/(m·K)	1 kcal/(m ² ·h·°C)=1.163 W/(m ² ·K) 1 Btu/(ft ² ·h·°F)=1.488 kcal/(m ² ·h·°C) =1.730 7 W/(m ² ·K)

附录 B

(规范性附录)

网格法等面积的划分原则及代表点的确定

B.1 圆形截面

将圆形截面划分为 N 个等面积的同心圆环,再用直径(或相互垂直的直径)将每个圆环分成相等面积的两(或四)部分。测点位于分成的两个同心圆环的分界线上,见图 B.1。

测点距圆形截面中心的位置按式(B.1)求得:

$$r_i = R \sqrt{\frac{2i-1}{2N}} \quad \dots\dots\dots (B.1)$$

式中:

r_i ——测点距圆形截面中心的距离,单位为毫米(mm);

R ——圆形截面半径,单位为毫米(mm);

i ——从圆形截面中心起算的测点序号;

N ——圆形截面所需划分的等面积圆环数。

当截面直径 d 不超过 400 mm,可在一条直径上布置测点;若直径 d 大于 400 mm,则应在相互垂直的两条直径上布置测点。

圆形截面直径 d 与划分圆环数 N 的规定见表 B.1。

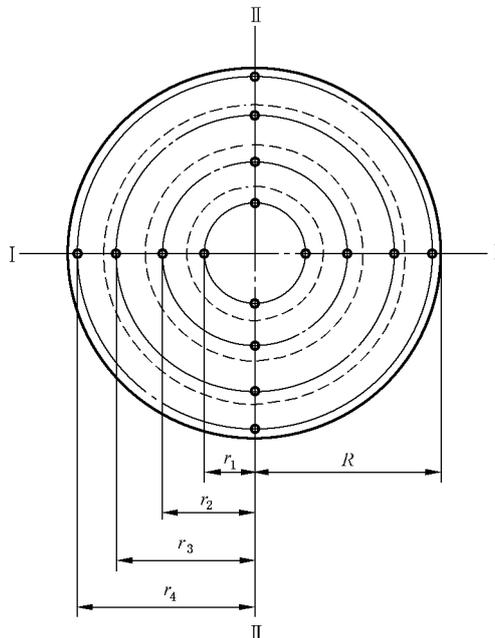


图 B.1 圆形截面测点分布示意图

表 B.1 圆形截面直径 d 与划分圆环数 N 的规定

项目	管道直径 d/mm			
	≤ 300	$> 300 \sim 400$	$> 400 \sim 600$	$d > 600$ 时, d 每增加 200
等面积圆环数 N	3	4	5	N 增加 1
测点总数	6	8	20	测点增加 4 ^a
^a 对于大型圆形管道, 一个截面的总测点数不宜超过 36 个。				

B.2 矩形截面

用经纬线将截面分割成若干等面积的接近于正方形的矩形, 各小矩形对角线的交点即为测点, 见图 B.2。

矩形截面边长 L (或 B) 与测点排数 N 的规定见表 B.2。

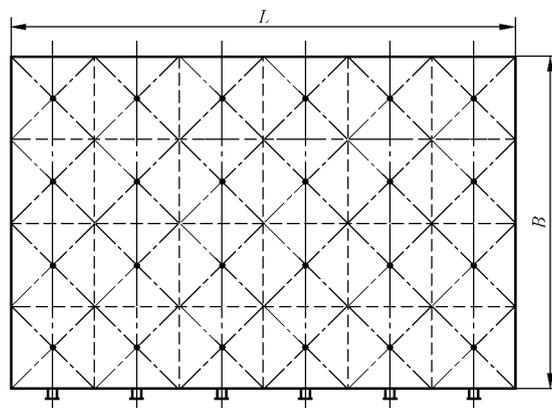


图 B.2 矩形截面测点分布示意图

表 B.2 矩形截面边长 L 与测点排数 N 的规定

项目	边长 L/mm			
	≤ 500	$> 500 \sim 1\ 000$	$> 1\ 000 \sim 1\ 500$	$> 1\ 500$
测点排数 N	3	4	5	L 每增长 500, 测点排数 N^a 增加 1
^a 对较大的矩形截面, 可适当减少 N 值。一个截面的总测点数不宜超过 36 个。				

附 录 C
(资料性附录)
气体浓度单位换算

气体浓度单位换算见表 C.1。

表 C.1 气体浓度单位 $\mu\text{L/L}$ (ppm)与 mg/m^3 的换算

序号	成分	分子量	1 $\mu\text{L/L}$ 换算成 mg/m^3	1 mg/m^3 换算成 $\mu\text{L/L}$
1	甲烷(CH_4)	16.043	0.715 9	1.396 9
2	一氧化碳(CO)	28.010	1.249 9	0.800 1
3	二氧化碳(CO_2)	44.009	1.963 8	0.509 2
4	氢(H_2)	2.016	0.090 0	11.116 1
5	硫化氢(H_2S)	34.082	1.520 8	0.657 5
6	氮气(N_2)	28.014	1.250 1	0.800 0
7	一氧化氮(NO)	30.006	1.339 0	0.746 9
8	二氧化氮(NO_2)	46.005	2.052 9	0.487 1
9	氧气(O_2)	31.998	1.427 8	0.700 4
10	二氧化硫(SO_2)	64.064	2.858 7	0.349 8
11	三氧化硫(SO_3)	80.063	3.572 6	0.279 9

附 录 D
(资料性附录)
锅炉灰、渣比例

D.1 推荐的锅炉灰、渣比例表

推荐的锅炉灰、渣比例见表 D.1。

表 D.1 推荐的锅炉灰、渣比例

燃烧方式与炉膛型式		捕渣率/%	飞灰份额/%
链条炉		—	15~30
沸腾炉		—	40~60
循环流化床锅炉		实际测量 ^a	实际测量 ^a
固态排渣火室炉	钢球或中速磨煤机	~10	~90 ^b
	竖井磨煤机	~15	~85
液态排渣炉	开式炉膛	20~35	—
	半开式炉膛	30~45	—
卧式旋风炉	煤粉:烟煤、褐煤	~80	—
	煤屑:烟煤	80~85	—
立式前置旋风炉(BTN 型)	无烟煤	50~60	—
	其他煤种	60~80	—
立式置旋风炉(KSG 型)	褐煤	80~85	—
^a 或取设计值。 ^b 其中省煤器下部沉降灰 3%，空气预热器下部沉降灰 5%。			

D.2 根据飞灰浓度计算飞灰比例的方法

当排烟中飞灰浓度按网格法等速取样时,飞灰占燃料总灰量的质量分数可按以下方法计算:

a) 固体和液体燃料

$$w_{as} = \frac{\rho_{as,fg} V_{fg,d} (100 - w_{c,as})}{1\ 000 w_{as,ar}} \dots\dots\dots (D.1)$$

式中:

$\rho_{as,fg}$ ——烟气中飞灰质量浓度,单位为克每立方米(g/m^3);

$V_{fg,d}$ ——每千克燃料燃烧生成的,在飞灰浓度测量截面处的干烟气体积,单位为立方米每千克(m^3/kg),可根据测量截面的烟气成分,按7.4.1计算。

b) 添加脱硫剂的固体和液体燃料

$$\omega_{\text{as}} = \frac{\rho_{\text{as,fg}} V_{\text{fg,d,des}} (100 - \omega_{\text{c,as}})}{1\,000 \omega_{\text{as,ar}}} \dots\dots\dots (D.2)$$

式中：

$V_{\text{fg,d,des}}$ ——添加脱硫剂后每千克燃料燃烧生成的，在飞灰浓度测量截面处的干烟气体积，单位为立方米每千克(m^3/kg)，可根据测量截面的烟气成分，按7.5.2计算。



附 录 E
(资料性附录)
常用气体和灰(渣)特性

E.1 常用气体和灰(渣)比热特性见表 E.1。

表 E.1 从 25 °C 到不同温度下常用气体平均定压比热容和灰(渣)比热

$t/^\circ\text{C}$	$c_{p,\text{CO}_2}/$ [kJ/(m ³ ·K)]	$c_{p,\text{N}_2}/$ [kJ/(m ³ ·K)]	$c_{p,\text{O}_2}/$ [kJ/(m ³ ·K)]	$c_{p,\text{H}_2\text{O}}/$ [kJ/(m ³ ·K)]	$c_{p,\text{H}_2}/$ [kJ/(m ³ ·K)]	$c_{p,\text{CO}}/$ [kJ/(m ³ ·K)]	$c_{p,\text{H}_2}/$ [kJ/(m ³ ·K)]	$c_{\text{as}}/$ [kJ/(kg·K)]
0	1.635 508	1.301 525	1.309 350	1.497 685	1.299 843	1.301 196	1.285 276	0.726 697
10	1.645 646	1.301 371	1.310 389	1.498 673	1.299 944	1.301 217	1.286 477	0.736 487
20	1.655 664	1.301 262	1.311 505	1.499 724	1.300 096	1.301 290	1.287 616	0.745 921
25	1.660 627	1.301 225	1.312 091	1.500 272	1.300 191	1.301 345	1.288 162	0.750 510
30	1.665 561	1.301 198	1.312 695	1.500 836	1.300 299	1.301 413	1.288 693	0.755 016
40	1.675 340	1.301 178	1.313 956	1.502 006	1.300 550	1.301 585	1.289 712	0.763 786
50	1.685 001	1.301 201	1.315 285	1.503 233	1.300 850	1.301 805	1.290 676	0.772 247
60	1.694 545	1.301 266	1.316 679	1.504 515	1.301 196	1.302 072	1.291 585	0.780 414
70	1.703 975	1.301 373	1.318 134	1.505 852	1.301 587	1.302 386	1.292 444	0.788 300
80	1.713 290	1.301 521	1.319 647	1.507 241	1.302 023	1.302 744	1.293 254	0.795 920
90	1.722 492	1.301 710	1.321 216	1.508 680	1.302 502	1.303 147	1.294 017	0.803 288
100	1.731 582	1.301 938	1.322 837	1.510 168	1.303 023	1.303 594	1.294 736	0.810 417
110	1.740 561	1.302 206	1.324 508	1.511 705	1.303 585	1.304 083	1.295 413	0.817 319
120	1.749 430	1.302 512	1.326 225	1.513 287	1.304 186	1.304 613	1.296 050	0.824 008
130	1.758 191	1.302 855	1.327 987	1.514 914	1.304 826	1.305 184	1.296 649	0.830 495
140	1.766 844	1.303 236	1.329 790	1.516 584	1.305 504	1.305 794	1.297 213	0.836 793
150	1.775 391	1.303 652	1.331 631	1.518 297	1.306 218	1.306 443	1.297 742	0.842 913
160	1.783 832	1.304 105	1.333 509	1.520 049	1.306 968	1.307 130	1.298 240	0.848 866
170	1.792 169	1.304 592	1.335 421	1.521 841	1.307 752	1.307 854	1.298 708	0.854 663
180	1.800 403	1.305 114	1.337 364	1.523 671	1.308 569	1.308 613	1.299 148	0.860 314
190	1.808 536	1.305 670	1.339 335	1.525 538	1.309 418	1.309 408	1.299 562	0.865 830
200	1.816 567	1.306 258	1.341 333	1.527 439	1.310 299	1.310 237	1.299 951	0.871 220
210	1.824 499	1.306 878	1.343 356	1.529 375	1.311 210	1.311 099	1.300 317	0.876 494
220	1.832 332	1.307 531	1.345 400	1.531 344	1.312 150	1.311 993	1.300 663	0.881 661
230	1.840 067	1.308 214	1.347 464	1.533 344	1.313 118	1.312 919	1.300 989	0.886 729
240	1.847 706	1.308 927	1.349 546	1.535 375	1.314 114	1.313 875	1.301 298	0.891 706
250	1.855 250	1.309 669	1.351 644	1.537 436	1.315 136	1.314 861	1.301 590	0.896 602
260	1.862 700	1.310 441	1.353 755	1.539 524	1.316 183	1.315 876	1.301 868	0.901 422
270	1.870 057	1.311 240	1.355 878	1.541 640	1.317 255	1.316 918	1.302 132	0.906 175
280	1.877 322	1.312 067	1.358 011	1.543 783	1.318 350	1.317 988	1.302 385	0.910 868
290	1.884 496	1.312 921	1.360 152	1.545 950	1.319 467	1.319 084	1.302 628	0.915 506
300	1.891 580	1.313 801	1.362 300	1.548 142	1.320 607	1.320 205	1.302 861	0.920 097

表 E.1 (续)

$t/^\circ\text{C}$	$c_{p,\text{CO}_2}/$ [kJ/(m ³ ·K)]	$c_{p,\text{N}_2}/$ [kJ/(m ³ ·K)]	$c_{p,\text{O}_2}/$ [kJ/(m ³ ·K)]	$c_{p,\text{wv}}/$ [kJ/(m ³ ·K)]	$c_{p,\text{a,d}}/$ [kJ/(m ³ ·K)]	$c_{p,\text{CO}}/$ [kJ/(m ³ ·K)]	$c_{p,\text{H}_2}/$ [kJ/(m ³ ·K)]	$c_{rs}/$ [kJ/(kg·K)]
310	1.898 576	1.314 706	1.364 452	1.550 357	1.321 767	1.321 350	1.303 087	0.924 646
320	1.905 484	1.315 636	1.366 608	1.552 594	1.322 947	1.322 519	1.303 306	0.929 158
330	1.912 306	1.316 590	1.368 764	1.554 853	1.324 146	1.323 711	1.303 520	0.933 639
340	1.919 043	1.317 568	1.370 921	1.557 132	1.325 363	1.324 925	1.303 729	0.938 093
350	1.925 696	1.318 568	1.373 077	1.559 431	1.326 598	1.326 160	1.303 936	0.942 525
360	1.932 266	1.319 589	1.375 229	1.561 749	1.327 849	1.327 415	1.304 140	0.946 939
370	1.938 754	1.320 633	1.377 378	1.564 085	1.329 116	1.328 690	1.304 344	0.951 339
380	1.945 161	1.321 696	1.379 521	1.566 438	1.330 398	1.329 983	1.304 548	0.955 727
390	1.951 488	1.322 780	1.381 657	1.568 808	1.331 694	1.331 293	1.304 753	0.960 107
400	1.957 738	1.323 883	1.383 786	1.571 193	1.333 003	1.332 621	1.304 959	0.964 482
450	1.987 844	1.329 661	1.394 275	1.583 336	1.339 723	1.339 485	1.306 047	0.986 341
500	2.016 155	1.335 816	1.404 429	1.595 783	1.346 666	1.346 652	1.307 288	1.008 255
550	2.042 811	1.342 261	1.414 170	1.608 476	1.353 749	1.354 023	1.308 742	1.030 153
600	2.067 950	1.348 909	1.423 456	1.621 373	1.360 896	1.361 505	1.310 442	1.051 743
650	2.091 712	1.355 675	1.432 284	1.634 449	1.368 037	1.369 004	1.312 391	1.072 510
700	2.114 238	1.362 472	1.440 685	1.647 697	1.375 112	1.376 432	1.314 565	1.091 718
750	2.135 624	1.369 213	1.448 701	1.661 132	1.382 064	1.383 701	1.316 938	1.101 423
800	2.155 752	1.375 852	1.456 239	1.674 777	1.388 835	1.390 756	1.319 619	1.102 988
850	2.174 732	1.382 371	1.463 346	1.688 544	1.395 421	1.397 597	1.322 575	1.105 368
900	2.192 697	1.388 758	1.470 083	1.702 356	1.401 827	1.404 231	1.325 752	1.108 339
950	2.209 753	1.395 004	1.476 501	1.716 153	1.408 055	1.410 663	1.329 110	1.111 737
1 000	2.225 987	1.401 103	1.482 640	1.729 889	1.414 110	1.416 900	1.332 615	1.115 437
1 050	2.241 471	1.407 053	1.488 531	1.743 529	1.419 996	1.422 947	1.336 240	1.119 346
1 100	2.256 266	1.412 852	1.494 202	1.757 044	1.425 718	1.428 809	1.339 964	1.123 394
1 150	2.270 423	1.418 498	1.499 675	1.770 413	1.431 279	1.434 491	1.343 769	1.127 531
1 200	2.283 987	1.423 993	1.504 967	1.783 618	1.436 683	1.439 999	1.347 639	1.131 717
1 250	2.296 996	1.429 337	1.510 096	1.796 647	1.441 936	1.445 337	1.351 561	1.135 925
1 300	2.309 485	1.434 532	1.515 075	1.809 489	1.447 040	1.450 510	1.355 525	1.140 137
1 350	2.321 483	1.439 580	1.519 914	1.822 136	1.452 001	1.455 523	1.359 522	1.144 340
1 400	2.333 020	1.444 484	1.524 626	1.834 582	1.456 822	1.460 382	1.363 544	1.148 526
1 450	2.344 118	1.449 246	1.529 217	1.846 824	1.461 507	1.465 089	1.367 583	1.152 691
1 500	2.354 801	1.453 870	1.533 698	1.858 857	1.466 060	1.469 651	1.371 635	1.156 834

注：表中 c_{p,CO_2} 、 c_{p,N_2} 、 c_{p,O_2} 、 $c_{p,\text{CO}}$ 、 c_{p,H_2} 、 $c_{p,\text{wv}}$ 、 $c_{p,\text{a,d}}$ 、 c_{rs} 分别为 CO_2 、 N_2 、 O_2 、 CO 、 H_2 、水蒸气、干空气的平均定压比热容和灰(渣)平均比热。

E.2 也可通过计算气体及灰(渣)的瞬时比热来求得气体及灰(渣)的平均比热。上述气体及灰(渣)的瞬时比热计算公式如式(E.1)：

$$c_p = \sum_{i=0}^4 a_i T_k^i \dots\dots\dots (E.1)$$

式中：

T_k ——工质温度,单位为开氏度(K)；

a_i ——系数,见表 E.2。

表 E.2 各种气体的 a_i 系数

T_k	系数	$c_{p,CO_2} /$ [kJ/(m ³ ·K)]	$c_{p,N_2} /$ [kJ/(m ³ ·K)]	$c_{p,O_2} /$ [kJ/(m ³ ·K)]	$c_{p,ww} /$ [kJ/(m ³ ·K)]	$c_{p,a,d} /$ [kJ/(m ³ ·K)]	$c_{p,CO} /$ [kJ/(m ³ ·K)]	$c_{p,H_2} /$ [kJ/(m ³ ·K)]	$c_{rs} /$ [kJ/(kg·K)]
$255 \leq T_k \leq 1\ 000$	a_0	8.917 235 47E-01	1.375 903 91E+00	1.405 364 82E+00	1.547 923 96E+00	1.377 802 12E+00	1.378 033 83E+00	1.092 835 55E+00	-5.655 445 70E-01
	a_1	3.244 484 49E-03	-5.281 163 98E-04	-1.122 951 73E-03	-6.725 297 62E-04	-6.466 205 91E-04	-6.013 786 52E-04	1.292 715 76E-03	8.316 385 05E-03
	a_2	-2.454 076 19E-06	1.064 882 91E-06	3.695 407 40E-06	2.208 139 86E-06	1.604 936 42E-06	1.371 446 92E-06	-2.885 549 09E-06	-1.813 044 89E-05
	a_3	7.436 737 42E-10	-4.467 797 79E-10	-3.646 986 24E-09	-1.807 745 47E-09	-1.112 594 05E-09	-7.547 304 14E-10	2.784 690 83E-09	1.911 871 52E-08
	a_4	2.350 193 09E-16	-5.183 080 23E-15	1.226 883 79E-12	5.676 873 59E-13	2.529 308 72E-13	8.896 951 95E-14	-9.358 128 68E-13	-7.404 688 42E-12
	a_6	1.656 880 15E+00	1.059 775 77E+00	1.341 665 65E+00	9.783 509 38E-01	1.117 803 06E+00	1.108 368 08E+00	1.134 636 91E+00	8.387 916 53E-02
$T_k > 1\ 000$	a_1	1.150 756 32E-03	5.950 975 21E-04	2.780 232 09E-04	1.155 937 03E-03	5.234 101 28E-04	5.531 085 12E-04	2.218 187 89E-04	2.012 331 92E-03
	a_2	-4.602 983 71E-07	-2.337 617 75E-07	-7.361 878 93E-08	-3.353 144 36E-07	-1.981 497 15E-07	-2.150 558 74E-07	-6.218 411 46E-10	-1.384 539 17E-06
	a_3	8.446 830 80E-11	4.249 451 74E-11	1.253 521 71E-11	4.707 056 21E-11	3.584 347 91E-11	3.849 698 52E-11	-7.889 309 04E-12	4.502 710 81E-10
	a_4	-5.766 819 68E-15	-2.899 229 56E-15	-8.879 790 72E-16	-2.568 933 12E-15	-2.452 317 52E-15	-2.575 988 96E-15	9.355 197 90E-16	-5.366 184 34E-14

平均比热可结合上述瞬时比热系数进行积分求解,见式(E.2):

$$\bar{c}_p = \frac{\int_{25+273.15}^{T_k} c_p dt}{T_k - (25 + 273.15)} \dots\dots\dots (E.2)$$

E.3 常用气体的特性见表 E.3。

表 E.3 常用气体的特性

气体名称	符号	密度/(kg/m ³)	低位发热量/(MJ/m ³)
甲烷	CH ₄	0.715 9	35.818
乙烷	C ₂ H ₆	1.341 8	63.748
丙烷	C ₃ H ₈	1.967 7	91.251
丁烷	C ₄ H ₁₀	2.593 7	118.646
戊烷	C ₅ H ₁₂	3.219 6	146.077
乙烯	C ₂ H ₄	1.251 9	59.063
丙烯	C ₃ H ₆	1.877 8	86.001
丁烯	C ₄ H ₈	2.503 7	113.508
苯	C ₆ H ₆	3.485 7	140.375
一氧化碳	CO	1.249 9	12.636
二氧化碳	CO ₂	1.963 8	—
氢	H ₂	0.090 0	10.798
硫化氢	H ₂ S	1.520 8	23.383
氮	N ₂	1.250 1	—
氧	O ₂	1.427 8	—
二氧化硫	SO ₂	2.858 7	—

附 录 F
(规范性附录)
煤、灰和吸收剂的比热

F.1 煤比热的估算公式

煤的比热按式(F.1)计算:

$$c_{c,ar} = c_{c,d} \frac{100 - w_{m,ar}}{100} + 4.1868 \frac{w_{m,ar}}{100} \dots\dots\dots (F.1)$$

式中:

$c_{c,ar}$ ——入炉煤的比热,单位为千焦每千克开[kJ/(kg·K)];

$c_{c,d}$ ——煤的干燥基比热,单位为千焦每千克开[kJ/(kg·K)],按式(F.2)计算:

$$c_{c,d} = 0.01 [c_{rs} w_{as,d} + c_c (100 - w_{as,d})] \dots\dots\dots (F.2)$$

式中:

c_{rs} ——灰(渣)比热,单位为千焦每千克开[kJ/(kg·K)];

$w_{as,d}$ ——入炉煤(干燥基)中灰分的质量分数,%;

c_c ——煤中可燃物质的比热,单位为千焦每千克开[kJ/(kg·K)],按式(F.3)计算:

$$c_c = 0.84 + 37.68 \times 10^{-6} (13 + w_{v,daf})(130 + t_c) \dots\dots\dots (F.3)$$

式中:

t_c ——煤的温度,单位为摄氏度(°C);

$w_{v,daf}$ ——入炉煤(干燥无灰基)中挥发分质量分数,% ,按式(F.4)计算:

$$w_{v,daf} = \frac{w_{v,ar}}{1 - w_{m,ar} - w_{as,ar}} \dots\dots\dots (F.4)$$

式中:

$w_{v,ar}$ ——入炉煤(收到基)中挥发分质量分数,%。

F.2 灰(渣)比热的估算公式

灰(渣)比热按式(F.5)计算:

$$c_{rs} = 0.71 + 5.02 \times 10^{-4} t_{rs} \dots\dots\dots (F.5)$$

式中:

t_{rs} ——灰(渣)温度,单位为摄氏度(°C)。

F.3 脱硫剂比热的估算公式

脱硫剂的比热计算公式同式(F.5)。

附 录 G
(资料性附录)
燃料基质换算

燃料基质换算系数见表 G.1。

表 G.1 燃料基质换算系数

已知燃料基质		欲求燃料基质			
		收到基(ar)	空气干燥基(ad)	干燥基(d)	干燥无灰基(daf)
收到基	ar	1	$\frac{100-w_{m,ad}}{100-w_{m,ar}}$	$\frac{100}{100-w_{m,ar}}$	$\frac{100}{100-w_{m,ar}-w_{as,ar}}$
空气干燥基	ad	$\frac{100-w_{m,ar}}{100-w_{m,ad}}$	1	$\frac{100}{100-w_{m,ad}}$	$\frac{100}{100-w_{m,ad}-w_{as,ad}}$
干燥基	d	$\frac{100-w_{m,ar}}{100}$	$\frac{100-w_{m,ad}}{100}$	1	$\frac{100}{100-w_{as,d}}$
干燥无灰基	daf	$\frac{100-w_{m,ar}-w_{as,ar}}{100}$	$\frac{100-w_{m,ad}-w_{as,ad}}{100}$	$\frac{100-w_{as,d}}{100}$	1

注： $w_{m,ar}$ ——入炉煤收到基中水分质量分数，在数值上等于全水分，%；
 $w_{as,ar}$ ——入炉煤收到基灰质量分数，%；
 $w_{m,ad}$ ——空气干燥基水分质量分数，%；
 $w_{as,ad}$ ——空气干燥基灰分质量分数，%；
 $w_{as,d}$ ——干燥基灰分质量分数，%。

附录 H
(资料性附录)

烟气中 CO₂ 含量的计算方法

H.1 未添加脱硫剂的燃料燃烧后,空气预热器出口干烟气中 CO₂ 体积分数按式(H.1)的计算:

$$\varphi_{\text{CO}_2, \text{fg}, \text{d}} = \frac{100V_{\text{CO}_2, \text{c}, \text{b}}}{V_{\text{fg}, \text{d}, \text{AH}, \text{lv}}} - \varphi_{\text{CO}, \text{fg}, \text{d}} \quad \dots\dots\dots (\text{H.1})$$

式中:

$V_{\text{fg}, \text{d}, \text{AH}, \text{lv}}$ ——每千克(标准立方米)燃料燃烧生成的空气预热器出口处的干烟气体积,单位为立方米每千克(m^3/kg)或立方米每立方米(m^3/m^3),按7.4.1计算;

$V_{\text{CO}_2, \text{c}, \text{b}}$ ——根据每千克或每立方米燃料实际燃烧掉的碳计算的 CO₂ 体积,单位为立方米每千克(m^3/kg)或立方米每立方米(m^3/m^3),固体及液体燃料按式(H.2)计算,气体燃料按式(H.3)计算:

$$V_{\text{CO}_2, \text{c}, \text{b}} = 1.8658 \frac{w_{\text{c}, \text{b}}}{100} \quad \dots\dots\dots (\text{H.2})$$

$$V_{\text{CO}_2, \text{c}, \text{b}} = \frac{\varphi_{\text{CO}_2, \text{g}} + \varphi_{\text{CO}, \text{g}} + \sum m\varphi_{\text{C}_m \text{H}_n, \text{g}}}{100} \quad \dots\dots\dots (\text{H.3})$$

H.2 添加脱硫剂的燃料燃烧后,烟气中 CO₂ 体积分数按式(H.4)计算:

$$\varphi_{\text{CO}_2, \text{fg}, \text{d}} = \frac{100V_{\text{CO}_2, \text{c}, \text{b}, \text{des}}}{V_{\text{fg}, \text{d}, \text{AH}, \text{lv}, \text{des}}} - \varphi_{\text{CO}, \text{fg}, \text{d}} \quad \dots\dots\dots (\text{H.4})$$

式中:

$V_{\text{fg}, \text{d}, \text{AH}, \text{lv}, \text{des}}$ ——添加脱硫剂后每千克燃料燃烧生成的空气预热器出口处的干烟气体积,单位为立方米每千克(m^3/kg),按7.5.2计算;

$V_{\text{CO}_2, \text{c}, \text{b}, \text{des}}$ ——根据每千克添加脱硫剂的燃料实际燃烧掉的碳计算的 CO₂ 体积,单位为立方米每千克(m^3/kg),按式(H.5)计算:

$$V_{\text{CO}_2, \text{c}, \text{b}, \text{des}} = 1.8658 \frac{w_{\text{c}, \text{b}}}{100} + 0.6989 r_{\text{Ca/S}} \frac{\eta_{\text{CaCO}_3, \text{dec}}}{100} \times \frac{w_{\text{S}, \text{ar}}}{100} \quad \dots\dots\dots (\text{H.5})$$

由于烟气中 CO 含量一般很少,因此实际计算时可忽略烟气中 CO 含量。

附录 I
(规范性附录)
锅炉散热损失

锅炉散热损失按式(I.1)计算:

$$q_5 = q_{5,\text{BMCR}} \times \frac{Q_r}{Q_{\text{BMCR}}} \times \beta \quad \dots\dots\dots (I.1)$$

式中,

$q_{5,\text{BMCR}}$ ——最大出力下的锅炉散热损失,按图 I.1 查取, %;

Q_r ——锅炉额定输出热量,单位为兆瓦(MW);

Q_{BMCR} ——锅炉最大输出热量,单位为兆瓦(MW);

β ——锅炉表面辐射率系数,按式(I.2)计算。

$$\beta = \frac{E}{0.3943} \quad \dots\dots\dots (I.2)$$

式中:

E ——锅炉表面辐射力率,单位为千瓦每平方米(kW/m²),按图 I.2 查取。

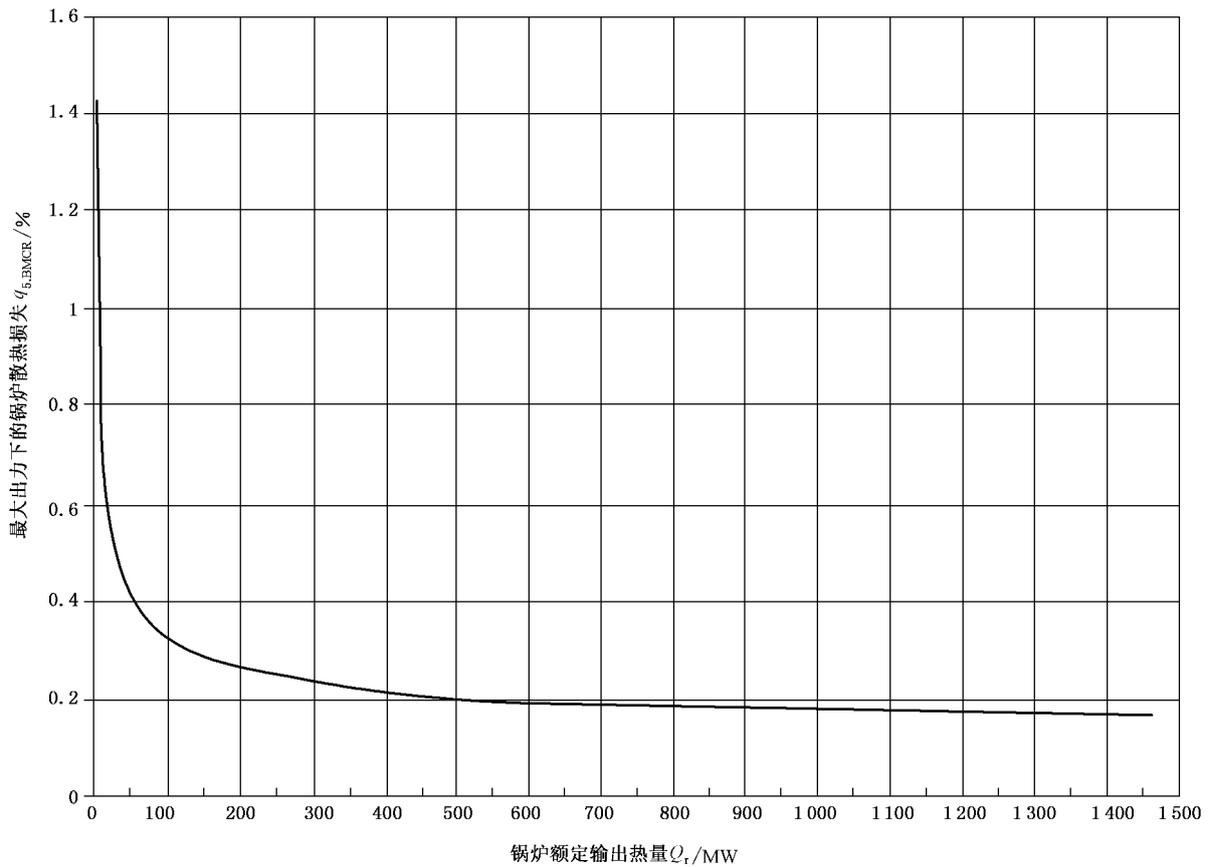


图 I.1 辐射散热损失标准曲线

图 I.1 曲线锅炉表面与环境温差为 28 °C, 锅炉表面风速为 0.5 m/s。其他条件参照图 I.2 修正。

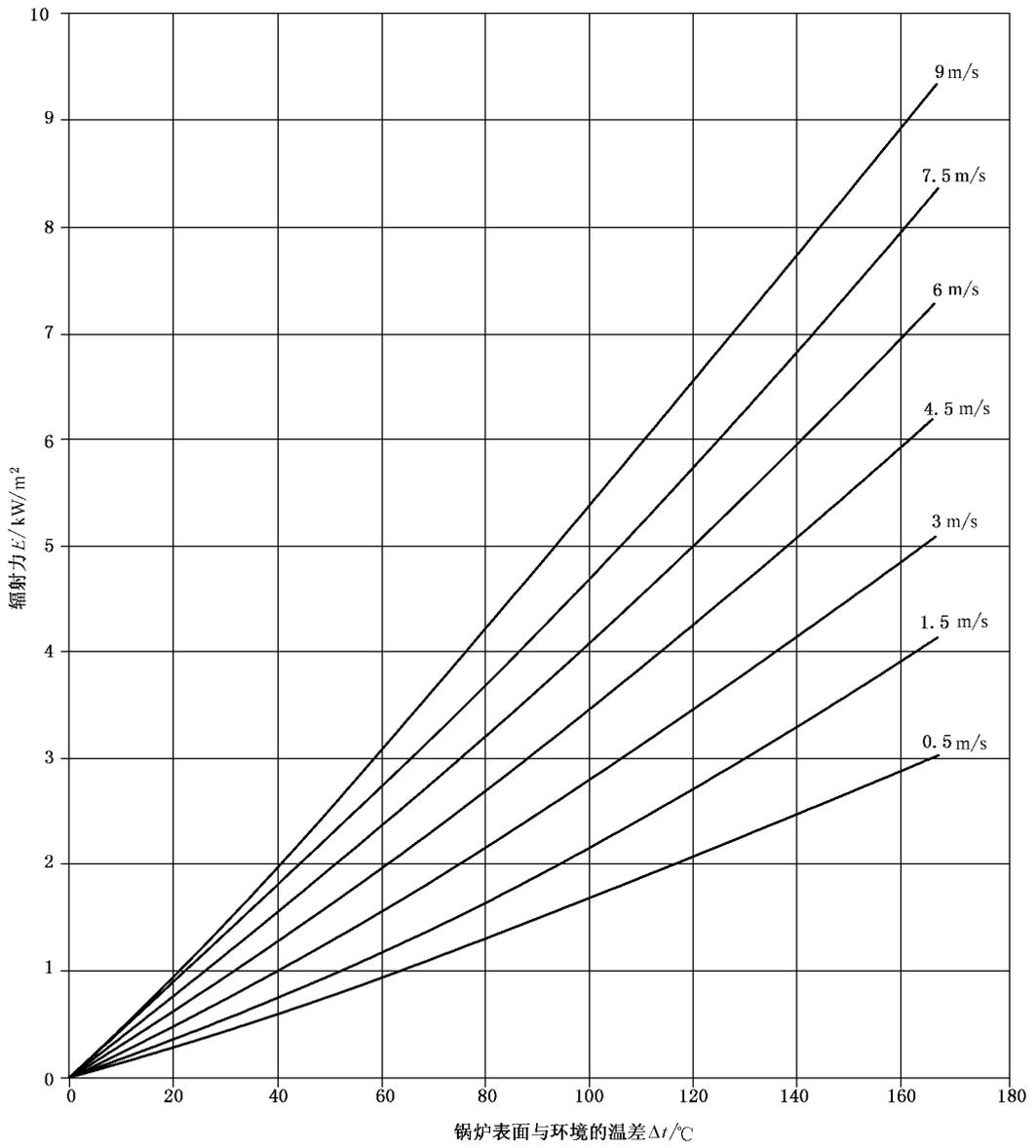


图 I.2 在不同风速和环境温差下的锅炉辐射率



参 考 文 献

- [1] W.瓦格纳,A.克鲁泽.水和蒸汽的性质[M].北京:科学出版社,2003.
-