

# 中华人民共和国国家标准

GB/T 10180—2017  
代替 GB/T 10180—2003

---

## 工业锅炉热工性能试验规程

Thermal performance test code for industrial boilers



2017-07-12 发布

2018-02-01 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 .....	I
1 范围 .....	1
2 规范性引用文件 .....	1
3 术语和定义 .....	2
4 符号和单位 .....	3
5 总则 .....	11
6 试验准备 .....	14
7 试验要求 .....	15
8 测量项目和试验用仪器仪表 .....	17
9 试验方法 .....	21
10 锅炉热效率的计算 .....	26
11 试验报告 .....	29
附录 A (资料性附录) 在锅炉热平衡系统边界内发生烟气冷凝且热量回收利用 的锅炉热效率计算 .....	30
附录 B (规范性附录) 锅炉运行试验 .....	33
附录 C (规范性附录) 煤和煤粉的采样和制备 .....	37
附录 D (规范性附录) 网格法等面积的划分原则及代表点的确定 .....	38
附录 E (规范性附录) 奥氏分析仪的使用 .....	40
附录 F (规范性附录) 散热损失的测量与计算 .....	42
附录 G (规范性附录) 饱和蒸汽湿度和过热蒸汽含盐量测定方法 .....	43
附录 H (资料性附录) 工业锅炉热工性能试验报告主要内容 .....	47
附录 I (规范性附录) 添加脱硫剂的循环流化床锅炉热效率的计算 .....	61
附录 J (资料性附录) 烟气、灰和空气的平均比定压热容、常用气体的有关量值、常用法定计量 单位及其换算 .....	68

## 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 10180—2003《工业锅炉热工性能试验规程》，与 GB/T 10180—2003 相比，除编辑性修改外主要技术变化如下：

- 修改了范围(见第 1 章,2003 年版的第 1 章)；
- 增加和修改了术语和定义(见第 3 章,2003 年版的第 3 章)；
- 增加和修改了符号和单位(见第 4 章,2003 年版的第 4 章)；
- 修改了锅炉在定型试验和验收试验时基准温度的确定方法(见 5.7,2003 年版的 7.10)；
- 修改了部分仪器设备的测量精度(见表 6,2003 年版的 9.4~9.8)；
- 修改了过热蒸汽锅炉热效率计算公式[见式(5)、式(6)、式(7),2003 年版的式(5)、式(6)]；
- 修改了锅炉热效率计算结果的误差规定(见 10.1.2,2003 年版的 9.3)；
- 修改了煤和煤粉的采样和制备(见附录 C,2003 年版的附录 A)；
- 修改了奥氏分析仪的使用(见附录 E,2003 年版的附录 C)；
- 修改了散热损失的测量与计算(见附录 F,2003 年版的附录 D)；
- 增加了进行热工性能试验的锅炉热平衡系统边界图及其相关要求(见 5.1)；
- 增加了试验数据记录的有效性要求(见 5.8)；
- 增加了多工质锅炉热效率计算方法(见 10.2)；
- 增加了添加脱硫剂的锅炉热效率计算方法(见附录 I)；
- 增加了在锅炉热平衡系统边界内发生烟气冷凝且热量回收利用的锅炉热效率计算方法(见附录 A)；
- 增加了锅炉运行试验方法(见附录 B)；
- 增加了网格法等面积的划分原则及代表点的确定(见附录 D)；
- 增加了添加脱硫剂的循环流化床锅炉热效率的计算(见附录 I)；
- 删除了轻型炉墙、重轻型炉墙等的不清晰表述内容(见 2003 年版的 7.1.1)。

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。

本标准负责起草单位：上海工业锅炉研究所。

本标准参加起草单位：福建省锅炉压力容器检验研究院、广东省特种设备检测研究院、上海市特种设备监督检测技术研究院、江联重工股份有限公司、江苏双良锅炉有限公司、苏州海陆重工股份有限公司、金牛股份有限公司、南通万达锅炉有限公司、大连市锅炉压力容器检验研究院、青岛荏原环境设备有限公司、泰山集团股份有限公司、中国特种设备检测研究院、天津宝成机械制造股份有限公司、无锡锡能锅炉有限公司。

本标准主要起草人：王善武、张元榕、李越胜、仝庆华、雷钦祥、潘瑞林、丁杰、肖新房、徐荻萍、李生德、杨麟、叶勉、管坚、丘性通、喻孟全、李春、孟向军、徐勇敏、王惠云、周冬雷、尹会坤、齐国利、李耀荣、朱永忠、赵博。

本标准所代替标准的历次版本发布情况为：

- GB/T 10180—1988、GB/T 10180—2003。

# 工业锅炉热工性能试验规程

## 1 范围

本标准规定了工业锅炉的热工性能试验中的术语与定义、符号和单位、总则、试验准备、试验要求、测量项目和试验用仪器仪表、试验方法、锅炉热效率的计算以及试验报告。

本标准适用于额定压力小于 3.8 MPa, 介质为水或液相有机热载体的固体燃料锅炉、液体燃料锅炉、气体燃料锅炉以及电加热锅炉的热工性能试验。

油田注汽锅炉、余热利用装置或设备(烟道式余热锅炉除外)、蒸汽压力不小于 3.8 MPa 且蒸汽温度小于 450 ℃的锅炉可参照使用。

## 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 260 石油产品水分测定法
- GB/T 384 石油产品热值测定法
- GB/T 474 煤样的制备方法
- GB/T 476 煤中碳和氢的测定方法
- GB/T 508 石油产品灰分测定法
- GB/T 1884 原油和液体石油产品密度实验室测定法(密度计法)
- GB/T 2900.48 电工名词术语 锅炉
- GB/T 3286(所有部分) 石灰石及白云石化学分析方法
- 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 10184 电站锅炉性能试验规程
- 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 13271 锅炉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 19227 煤中氮的测定方法
- GB 23971 有机热载体
- GB/T 24747 有机热载体安全技术条件
- GB/T 25214 煤中全硫测定 红外光谱法
- GB/T 28730 固体生物质燃料样品制备方法
- GB/T 28731 固体生物质燃料工业分析方法
- GB/T 28732 固体生物质燃料全硫测定方法

- GB/T 28733 固体生物质燃料全水分测定方法
- GB/T 28734 固体生物质燃料中碳氢测定方法
- GB/T 30725 固体生物质燃料灰成分测定方法
- GB/T 30726 固体生物质燃料灰熔融性的测定方法
- GB/T 30727 固体生物质燃料发热量测定方法
- GB/T 30728 固体生物质燃料中氮的测定方法
- GB/T 30732 煤的工业分析方法 仪器法
- GB/T 30733 煤中碳氢氮的测定 仪器法
- CJ/T 313 生活垃圾采样和分析方法
- 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
- NB/T 47034 工业锅炉技术条件
- NY/T 1879 生物质固体成型燃料采样方法
- NY/T 1880 生物质固体成型燃料样品制备方法
- NY/T 1881.1 生物质固体成型燃料试验方法 第1部分:通则
- NY/T 1881.2 生物质固体成型燃料试验方法 第2部分:全水分
- NY/T 1881.3 生物质固体成型燃料试验方法 第3部分:一般分析样品水分
- NY/T 1881.4 生物质固体成型燃料试验方法 第4部分:挥发分
- NY/T 1881.5 生物质固体成型燃料试验方法 第5部分:灰分

### 3 术语和定义



GB/T 2900.48界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

#### 3.1

##### **固体燃料 solidfuel**

固态的燃料,包括煤、油页岩、生物质燃料和可燃固体废料等。

#### 3.2

##### **液体燃料 liquidfuel**

液态的燃料,包括石油、燃料油、工业废液(如碱液、镁液等)等。

#### 3.3

##### **气体燃料 gasfuel**

气态的燃料,包括天然气、高炉煤气、焦炉煤气、城市煤气、液化气等。

#### 3.4

##### **低位发热值 net calorific value**

单位体积的气体燃料或单位质量的固体或液体燃料在特定条件下完全燃烧所释放的热量中扣除烟气中水蒸气凝结成水的汽化潜热后所得的热量。

#### 3.5

##### **输出热量 heat output**

通过蒸汽、水或其他工质由锅炉向外提供的热量与进入锅炉的水或其他工质带入热量之差。

#### 3.6

##### **锅炉净效率 net boiler efficiency**

锅炉有效利用热量扣除自用蒸汽和辅机设备耗用动力折算热量后的锅炉效率。

## 3.7

**正平衡测量法 direct procedure**

直接测量输入热量和输出热量来确定锅炉热效率的方法,也称直接测量法或输入输出法。

## 3.8

**反平衡测量法 indirect procedure**

通过测量各种燃烧产物热损失和锅炉散热损失来确定锅炉热效率的方法,也称间接测量法、热损失法或能量平衡法。

## 3.9

**多工质锅炉 multi medium boiler**

锅炉热平衡系统边界内有两种或两种以上被加热的工质(如水和蒸汽、热载体和热水、热载体和水及空气等),并分别输出至各自用热设备的锅炉。

## 3.10

**脱硫剂 desulfurizer**

用于捕捉和吸收烟气中二氧化硫的添加剂。

注:本标准专指石灰石(其主要成分为  $\text{CaCO}_3$ ,有少量  $\text{MgCO}_3$ 、杂质和水)。

## 3.11

**煅烧反应 calcination reaction**

脱硫剂分解为  $\text{CaO}$ 、 $\text{MgO}$  和  $\text{CO}_2$  的一种吸热化学反应。

## 3.12

**硫酸盐化反应 sulfation reaction**

$\text{CaO}$ 、 $\text{MgO}$  与  $\text{O}_2$ 、 $\text{SO}_2$  生成  $\text{CaSO}_4$ 、 $\text{MgSO}_4$  的一种放热化学反应。

## 3.13

**脱硫效率 desulfurization efficiency**

随燃料进入炉膛内,但没有以二氧化硫形式排放的硫占入炉燃料总硫分的百分比。

## 4 符号和单位

表 1 中所列符号及单位适用于本文件。

表 1 符号和单位

序号	符号	名称	单位	备注
1	$\Sigma A$	总受热面积	$\text{m}^2$	
2	$A_{\text{AH}}$	空气预热器受热面	$\text{m}^2$	
3	$A_{\text{ar}}$	收到基灰分	%	适用于固体燃料、液体燃料
4	$A_{\text{CaSO}_4}$	相应每千克入炉燃料,脱硫后生成的硫酸钙的质量	$\text{kg/kg}$	
5	$A_{\text{CaO}}$	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	$\text{kg/kg}$	
6	$A_{\text{con}}$	对流管束受热面	$\text{m}^2$	
7	$A_{\text{ECO}}$	省煤器受热面	$\text{m}^2$	
8	$A_{\text{r,b}}$	炉膛辐射受热面(或悬浮段受热面)	$\text{m}^2$	

表 1 (续)

序号	符号	名称	单位	备注
9	$A_{js}$	添加脱硫剂后,相应每千克入炉燃料灰分的质量	kg/kg	
10	$A_{SH}$	过热器受热面	$m^2$	
11	$A_{zz}$	相应每千克入炉燃料,脱硫剂灰分的质量	kg/kg	
12	$A_{wfi}$	脱硫剂未分解的碳酸钙的质量	kg/kg	
13	$B$	燃料消耗量(入炉燃料的质量或体积流量)	kg/h 或 $m^3/h$	
14	$B_{shs}$	脱硫剂质量流量	kg/h	
15	$C_{ar}$	收到基碳	%	适用于固体燃料、液体燃料
16	$C_{as}$	飞灰可燃物含量	%	
17	$C_{ca}$	冷灰可燃物含量	%	
18	$C_{cl}$	漏煤可燃物含量	%	
19	$C_{oa}$	溢流灰可燃物含量	%	
20	$C_{pd}$	烟道灰(沉降灰)可燃物含量	%	
21	$C_s$	炉渣可燃物含量	%	
22	$C_{rec}$	循环灰可燃物含量	%	
23	$CH_4$	收到基甲烷	%	适用于气体燃料
24	$C_2H_6$	收到基乙烷	%	
25	$C_3H_8$	收到基丙烷	%	
26	$C_4H_{10}$	收到基丁烷	%	
27	$C_5H_{12}$	收到基戊烷	%	
28	CO	收到基一氧化碳	%	适用于气体燃料
29	CO'	排烟处 CO	%	
30	CO <sub>2</sub>	收到基二氧化碳	%	适用于气体燃料
31	$\sum C_m H_n$	收到基不饱和烃	%	适用于气体燃料
32	$CaCO_{3,ar}$	脱硫剂中碳酸钙的质量分数	%	
33	$C_m H'_n$	排烟处 $C_m H_n$	%	
34	$C'_{ar}$	燃料收到基实际烧掉的碳质量分数	%	
35	$C$	灰渣中平均含碳量与燃料计算灰量之比	%	
36	$c_{as}$	飞灰比热	kJ/(kg·°C)	
37	$c_{ca}$	冷灰(炉底渣)比热	kJ/(kg·°C)	
38	$c_{cl}$	漏煤比热	kJ/(kg·°C)	
39	$c_{d,fg}$	排烟处干烟气平均比定压热容	kJ/(m <sup>3</sup> ·°C)	
40	$c_{en}$	热空气进口温度下的平均比热	kJ/(m <sup>3</sup> ·°C)	
41	$c_{H_2O}$	排烟处水蒸气平均比定压热容	kJ/(m <sup>3</sup> ·°C)	

表 1 (续)

序号	符号	名称	单位	备注
42	$c_{lv}$	热空气出口温度下的平均比热	$\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$	
43	$c_{oa}$	溢流灰比热	$\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$	
44	$c_{pd}$	烟道灰(沉降灰)比热	$\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$	
45	$c_{rec}$	循环灰比热	$\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$	
46	$c_s$	炉渣比热	$\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$	
47	$(ct)_{as}$	飞灰焓	$\text{kJ}/\text{kg}$	
48	$(ct)_{ca}$	冷灰(炉底渣)焓	$\text{kJ}/\text{kg}$	
49	$(ct)_{cl}$	漏煤焓	$\text{kJ}/\text{kg}$	
50	$(ct)_{oa}$	溢流灰焓	$\text{kJ}/\text{kg}$	
51	$(ct)_{pd}$	烟道灰(沉降灰)焓	$\text{kJ}/\text{kg}$	
52	$(ct)_{rec}$	循环灰焓	$\text{kJ}/\text{kg}$	
53	$(ct)_s$	炉渣焓	$\text{kJ}/\text{kg}$	
54	$\text{Cl}^-_{\text{sat, st}}$	饱和蒸汽凝结水氯根含量	$\text{mg}/\text{kg}$	
55	$\text{Cl}^-_w$	锅水氯根含量	$\text{mg}/\text{kg}$	
56	$D_{\text{ato}}$	雾化用蒸汽耗汽率	$\text{kg}/\text{kg}$	
57	$D_{\text{c, fw}}$	余热利用装置(冷凝器)的给水流量	$\text{kg}/\text{h}$	
58	$D_{\text{con}}$	锅炉折算蒸发量	$\text{kg}/\text{h}$	
59	$D_{\text{fw}}$	给水流量	$\text{kg}/\text{h}$	
60	$D_{\text{isc}}$	冷渣器划归锅炉热平衡系统边界内冷却工质流量	$\text{kg}/\text{h}$	
61	$D_{\text{no}}$	受试锅炉在试验工况时的名义蒸发量	$\text{kg}/\text{h}$	
62	$D_{\text{out}}$	输出蒸汽量(即锅炉实测蒸发量)	$\text{kg}/\text{h}$	
63	$D_{\text{p, st}}$	雾化用蒸汽耗量	$\text{kg}/\text{h}$	
64	$D_{\text{pu}}$	自用蒸汽量	$\text{kg}/\text{h}$	
65	$D_r$	锅炉的额定蒸发量	$\text{kg}/\text{h}$	
66	$D_s$	过热蒸汽流量	$\text{kg}/\text{h}$	
67	$d$	蒸汽引出管内径	$\text{mm}$	
68	$d_s$	蒸汽试样管孔内径	$\text{mm}$	
69	$E_b$	相当于每小时每吨蒸汽的用电量	$\text{kW}$	
70	$F$	锅炉散热总表面积, 散热总表面积包括锅炉热平衡系统边界内的锅炉本体、余热回收装置、烟道和水箱等部件	$\text{m}^2$	
71	$F_1, F_2, \dots, F_n$	分别为各区段的散热面积	$\text{m}^2$	
72	$F_{\text{fl}}$	锅炉分离回送系统等的表面积之和	$\text{m}^2$	
73	$F_{\text{sep}}$	锅炉分离回送系统等的表面积之和, 包括分离器、立管和回料阀的表面积	$\text{m}^2$	

表 1 (续)

序号	符号	名称	单位	备注
74	$F_Z$	锅炉散热总表面积	$m^2$	
75	$f_{xz}$	面积修正系数		
76	$G$	热水(有机热载体)锅炉工质循环流量	kg/h	
77	$G_{ca}$	冷灰(炉底渣)质量	kg/h	
78	$G_{cl}$	漏煤质量	kg/h	
79	$G_{Hum}$	测定蒸汽湿度时的锅水取样量	kg/h	
80	$G_{oa}$	溢流灰质量	kg/h	
81	$G_{pd}$	烟道灰(沉降灰)质量	kg/h	
82	$G_{rec}$	循环灰排灰质量	kg/h	
83	$G_s$	测定过热蒸汽含盐量时的蒸汽取样量	kg/h	
84	$G_{sl}^{hum}$	湿炉渣质量	kg/h	
85	$G_{sl}$	炉渣质量	kg/h	
86	$G_{sat,st}$	饱和蒸汽冷凝水的电导率值	$\mu S/cm$	
87	$G_{to,ash}$	锅炉总排灰质量	kg/h	
88	$G_w$	锅水的电导率值	$\mu S/cm$	
89	$H$	自然通风烟囱高度	m	
90	$H_{ar}$	收到基氢	%	适用于固体燃料、液体燃料
91	$H_{fw}$	给水泵(循环泵、热载体泵)扬程	m	
92	$H'_2$	排烟处 $H_2$	%	
93	$H_2S$	收到基硫化氢	%	适用于气体燃料
94	$H_2S'$	排烟处 $H_2S$	%	
95	$h_{ca}$	入炉冷空气焓	kJ/kg	
96	$h_{c,iw}$	余热利用装置(冷凝器)中的进水焓	kJ/kg	
97	$h_{c,ow}$	余热利用装置(冷凝器)中的出水焓	kJ/kg	
98	$h_{ds}$	排烟处烟气焓	kJ/kg 或 $kJ/m^3$	
99	$h_{fw}$	给水焓	kJ/kg	
100	$h_{fw}^*$	设计参数下给水焓	kJ/kg	
101	$h_{fw,h}$	热水(有机热载体)锅炉进口工质焓	kJ/kg	
102	$h''_{isc}$	冷渣器划归锅炉热平衡系统边界内冷却工质出口焓值	kJ/kg	
103	$h'_{isc}$	冷渣器划归锅炉热平衡系统边界内冷却工质进口焓值	kJ/kg	
104	$h_{ow}$	热水(有机热载体)锅炉出口工质焓	kJ/kg	
105	$h_{pu}$	自用蒸汽焓	kJ/kg	
106	$h_{st,sh,lv}$	过热蒸汽焓	kJ/kg	

表 1 (续)

序号	符号	名称	单位	备注
107	$h_{st,sh,lv}^*$	设计参数下过热蒸汽焓	kJ/kg	
108	$h_{sat,st}$	饱和蒸汽焓	kJ/kg	
109	$h_{sat,st}^*$	设计参数下饱和蒸汽焓	kJ/kg	
110	$i$	从圆形截面中心起算的代表点序号		
111	$K_{qi}$	修正系数	%	
112	$\sum K_i$	容积成分之和	%	适用于气体燃料
113	$M_{ar}$	收到基水分	%	适用于固体燃料、液体燃料
114	$M_{ar,fo}$	燃油含水量	%	
115	$M_s$	炉渣淋水后含水量	%	
116	$M_t^{shs}$	石灰石含水量	%	
117	$M_w$	气体燃料含水量	g/m <sup>3</sup>	适用于气体燃料
118	$mo_{gycw}$	燃料燃烧干烟气[包括碳燃烧生成 CO <sub>2</sub> 、实际生成的 SO <sub>2</sub> (不包括脱硫吸收的硫、燃料中的 N <sub>2</sub> 以及脱硫剂产生的干烟气 CO <sub>2</sub> )]的摩尔数	mol/kg	
119	$mo_{tlgy}$	脱硫剂生成烟气的摩尔数	mol/kg	
120	$mo_{ilk}$	添加脱硫剂后修正的理论干空气量	mol/kg	
121	$mo_{zz,as}$	脱硫剂中收到基杂质(包括碳酸镁)的质量分数	%	
122	$N$	电加热锅炉每小时用电量	kW	
123	$N_{ar}$	收到基氮	%	适用于固体燃料、液体燃料
124	$N_b$	燃烧器电动机功率	kW	
125	$N_{ba}$	送风机电动机功率	kW	
126	$N_{cg}$	磨煤机电动机功率	kW	
127	$N_{cs}$	给煤机电动机功率	kW	
128	$N_{com}$	燃烧设备每小时用电量 (包括燃油气燃烧器电机、燃油加热器等)	kW	
129	$N_{fr}$	破碎机电动机功率	kW	
130	$N_{fw}$	给水泵电动机功率	kW	
131	$N_g$	炉排传动装置电动机功率	kW	
132	$N_h$	燃油加热器功率	kW	
133	$N_{in,a}$	引风机电动机功率	kW	
134	$N_m$	磨煤机电动机功率	kW	
135	$N_{oth}$	其他电动机功率	kW	
136	$N_{sc}$	筛分机电动机功率	kW	

表 1 (续)

序号	符号	名称	单位	备注
137	$\Sigma N$	每小时总用电量	kW	
138	$N_2$	收到基氮气	%	适用于气体燃料
139	$Na_{\text{sat,st}}^+$	饱和蒸汽凝结水钠离子含量	mg/kg	
140	$Na_w^+$	锅水钠离子含量	mg/kg	
141	$n_h$	圆形截面所需划分的等面积圆环数	个	
142	$n_p$	测点排数	个	
143	$n_s$	取样孔数量	个	
144	$O_{\text{ar}}$	收到基氧	%	适用于固体燃料、液体燃料
145	$O_2$	收到基氧气	%	适用于气体燃料
146	$O'_2$	添加脱硫剂后排烟的干烟气中氧气的容积百分数	%	
147	$P$	蒸汽压力(表压)	MPa	
148	$P_{\text{am}}$	实测蒸汽压力(表压)	MPa	
149	$P_{\text{ba}}$	送(鼓)风机风压	Pa	
150	$P_{\text{fw}}$	给水压力	MPa	
151	$P_{\text{fw,h}}$	热水(有机热载体)锅炉进口工质压力	MPa	
152	$P_{\text{in,a}}$	引风机风压	Pa	
153	$P_{\text{no}}$	受试锅炉在试验工况时的名义工质(蒸汽)压力	MPa	
154	$P_{\text{ow}}$	热水(有机热载体)锅炉出口工质压力	MPa	
155	$P_{\text{p,st}}$	雾化用蒸汽压力	MPa	
156	$P_r$	额定蒸汽压力	MPa	
157	$Q_{\text{act}}$	热水(有机热载体)锅炉实际输出热量	MW	
158	$Q_{\text{ba}}$	送(鼓)风机风量	$\text{m}^3/\text{h}$	
159	$Q_{\text{c,a}}$	余热利用装置(冷凝器)的有效吸收热量	kJ/h	
160	$Q_{\text{ex}}$	加热燃料或外来热量	kJ/kg 或 $\text{kJ}/\text{m}^3$	用外来热量加热燃料或空气时,相应于每千克或标准状态下每立方米燃料所携带的热量
161	$Q_f$	燃料物理热	kJ/kg 或 $\text{kJ}/\text{m}^3$	
162	$Q_{\text{fw}}$	给水泵(循环泵、热载体泵)流量	$\text{m}^3/\text{h}$	
163	$Q_{\text{in,a}}$	引风机风量	$\text{m}^3/\text{h}$	
164	$Q_{\text{in}}$	输入热量	kJ/kg 或 $\text{kJ}/\text{m}^3$	
165	$Q_{\text{net,v,ar}}$	收到基低位发热值	kJ/kg	适用于固体燃料
166	$(Q_{\text{net,v,ar}})_{\text{fo}}$	燃油收到基低位发热值	kJ/kg	适用于液体燃料

表 1 (续)

序号	符号	名称	单位	备注
167	$(Q_{\text{net,v,ar}})_g$	燃气收到基低位发热值	$\text{kJ}/\text{m}^3$	适用于气体燃料
168	$Q_{\text{out}}$	热水锅炉的实际输出热量	$\text{kJ}/\text{h}$ 或 $\text{kJ}/\text{m}^3$	
169	$Q_{\text{du}}$	自用蒸汽带入热量	$\text{kJ}/\text{kg}$ 或 $\text{kJ}/\text{m}^3$	
170	$Q_r$	热水(有机热载体)锅炉额定输出热量	$\text{kJ}/\text{kg}$ 或 $\text{kJ}/\text{m}^3$	
171	$Q_1$	每小时总有效吸收热量	$\text{kJ}/\text{h}$	
172	$\sum_{i=1}^n Q_{i1}$	每小时各工质有效吸收热量之和	$\text{kJ}/\text{h}$	
173	$Q_2$	烟气带走的热量	$\text{kJ}/\text{kg}$ 或 $\text{kJ}/\text{m}^3$	
174	$Q_3$	气体不完全燃烧热损失量	$\text{kJ}/\text{kg}$ 或 $\text{kJ}/\text{m}^3$	
175	$Q_4$	固体不完全燃烧热损失量	$\text{kJ}/\text{kg}$	
176	$Q_5$	锅炉散热损失量	$\text{kJ}/\text{kg}$ 或 $\text{kJ}/\text{m}^3$	
177	$Q_6$	灰渣物理热损失量,即炉渣、循环灰、烟道灰(沉降灰)和飞灰等排出锅炉设备时所带走的显热	$\text{kJ}/\text{kg}$	
178	$Q_7$	脱硫热损失量	$\text{kJ}/\text{kg}$	
179	$q_v$	炉膛容积热负荷	$\text{W}/\text{m}^3$	
180	$q_R$	炉排面积热负荷	$\text{W}/\text{m}^2$	
181	$q_2$	排烟热损失	%	
182	$q_3$	气体不完全燃烧热损失	%	
183	$q_4$	固体不完全燃烧热损失	%	
184	$q_5$	散热损失	%	
185	$q_6$	灰渣物理热损失	%	
186	$q_7$	石灰石脱硫热损失	%	
187	$\sum q$	热损失之和	%	
188	$q_{5r}$	锅炉在额定蒸发量(热功率)下的散热损失	%	
189	$q_{51t}$	锅炉散热损失的查表值	$\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$	
190	$q_{51}, q_{52}, \dots, q_{5n}$	分别为各区段的散热强度	$\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$	
191	$R$	炉排面积	$\text{mm}$	
192	$R_g$	形截面半径	$\text{m}^2$	
193	$R_{70}$	煤粉细度	%	适用于固体燃料
194	$RO'_2$	排烟处 $RO_2$ (即: $\text{CO}_2 + \text{SO}_2$ )	%	
195	$RO_2^{\text{max}}$	理论最大 $RO_2$ (即: $\text{CO}_2 + \text{SO}_2$ )百分率	%	
196	$r_{\text{Ca/S}}$	钙硫摩尔比		
197	$r_i$	代表点距圆形截面中心的距离	$\text{mm}$	
198	$S_{\text{ar}}$	收到基硫	%	适用于固体燃料、液体燃料

表 1 (续)

序号	符号	名称	单位	备注
199	$S_{st,RH,lv}$	过热蒸汽含盐量	$\mu\text{g}/\text{kg}$	
200	$t_{as}$	飞灰温度	$^{\circ}\text{C}$	
201	$t_{ca}$	入炉冷空气温度	$^{\circ}\text{C}$	
202	$t_{cl}$	漏煤温度	$^{\circ}\text{C}$	
203	$t_{cs}$	冷灰(底渣)温度	$^{\circ}\text{C}$	
204	$t_{ds}$	排烟温度	$^{\circ}\text{C}$	
205	$t_{en}$	热空气进口温度	$^{\circ}\text{C}$	
206	$t_{fo}$	进油温度	$^{\circ}\text{C}$	
207	$t_{fw}$	给水温度	$^{\circ}\text{C}$	
208	$t_{(w,h)}$	热水(有机热载体)锅炉进口工质温度	$^{\circ}\text{C}$	
209	$t_{ha}$	入炉热空气温度	$^{\circ}\text{C}$	
210	$t_{in}$	燃油燃烧器进油温度	$^{\circ}\text{C}$	
211	$t_{lv}$	热空气出口温度	$^{\circ}\text{C}$	
212	$t_{ow}$	热水(有机热载体)锅炉出口工质温度	$^{\circ}\text{C}$	
213	$t_{oa}$	溢流灰温度	$^{\circ}\text{C}$	
214	$t_{pd}$	烟道灰(沉降灰)温度	$^{\circ}\text{C}$	
215	$t_{rec}$	循环灰温度	$^{\circ}\text{C}$	
216	$t_{ex,rec}$	实测离开锅炉热平衡系统边界的循环灰温度	$^{\circ}\text{C}$	
217	$t_{r,st}$	额定蒸汽温度	$^{\circ}\text{C}$	
218	$t_s$	炉渣温度	$^{\circ}\text{C}$	
219	$t_{st,sh,lv}$	过热蒸汽温度	$^{\circ}\text{C}$	
220	$V_{def}$	干燥无灰基挥发分	%	适用于固体燃料
221	$V_{d,fg}$	排烟处干烟气体积	$\text{m}^3/\text{kg}$	
222	$V_{ds}$	排烟处烟气体积	$\text{m}^3/\text{kg}$ 或 $\text{m}^3/\text{m}^3$	
223	$V_{ds}^{1.75}$	根据 GB 13271 规定, $V_{ds}$ 为过量空气系数在 1.75 时的干烟气体积	$\text{m}^3/\text{kg}$	
224	$V_{f,b}$	炉膛容积	$\text{m}^3$	
225	$V_{\text{H}_2\text{O}}$	排烟处水蒸气体积	$\text{m}^3/\text{kg}$	
226	$V_{\text{H}_2\text{O}}^0$	理论水蒸气体积	$\text{m}^3/\text{kg}$ 或 $\text{m}^3/\text{m}^3$	
227	$V^0$	理论空气量	$\text{m}^3/\text{kg}$ 或 $\text{m}^3/\text{m}^3$	
228	$V_{\text{N}_2}^0$	理论氮气体积	$\text{m}^3/\text{kg}$ 或 $\text{m}^3/\text{m}^3$	
229	$V_{\text{RO}_2}$	$\text{RO}_2$ 容积	$\text{m}^3/\text{kg}$ 或 $\text{m}^3/\text{m}^3$	
230	$V_{\text{SO}_2}^0$	锅炉排烟中二氧化硫气体理论计算排放值	$\text{mg}/\text{m}^3$	

表 1 (续)

序号	符号	名称	单位	备注
231	$V_{\text{SO}_2}$	锅炉排烟中二氧化硫气体实测值折算为 $\alpha_{\text{ds}} = 1.75$ 时干烟气中的质量含量	$\text{mg}/\text{m}^3$	
232	$V_{\text{ss}}$	热空气标态流量	$\text{m}^3/\text{h}$	
233	$(V_{\text{d,fg}}^0)^{\text{c}}$	添加脱硫剂后修正的理论干烟气体量	$\text{m}^3/\text{kg}$	
234	$(V_{\text{d,ag}})^{\text{c}}$	添加脱硫剂后的实际干空气量	$\text{m}^3/\text{kg}$	
235	$(V_{\text{d,ag}}^0)^{\text{c}}$	添加脱硫剂后修正的理论干空气量	$\text{m}^3/\text{kg}$	
236	$\alpha_{\text{as}}$	飞灰含灰量占入炉煤总灰量的质量分数	%	
237	$\alpha_{\text{ca}}$	冷灰(炉底渣)含灰量占入炉煤总灰量的质量分数	%	
238	$\alpha_{\text{cl}}$	漏煤含灰量占入炉煤总灰量的质量分数	%	
239	$\alpha_{\text{ds}}$	排烟处过量空气系数		
240	$\alpha_{\text{oa}}$	溢流灰含灰量占入炉煤总灰量的质量分数	%	
241	$\alpha_{\text{pd}}$	烟道灰(沉降灰)含灰量占入炉煤总灰量的质量分数	%	
242	$\alpha_{\text{rec}}$	循环灰含灰量占入炉煤总灰量的质量分数	%	
243	$\alpha_{\text{s}}$	炉渣含灰量占入炉煤总灰量的质量分数	%	
244	$\beta$	燃料特征系数	—	
245	$\beta_{\text{j}}$	脱硫剂中分解的碳酸钙占碳酸钙总体的质量分数	%	
246	$\gamma$	汽化潜热	$\text{kJ}/\text{kg}$	
247	$\rho_{\text{ar}}$	收到基密度	$\text{kg}/\text{m}^3$	适用于气体燃料
248	$\rho_{\text{d}}$	干气体燃料密度	$\text{kg}/\text{m}^3$	适用于气体燃料
249	$\rho_{\text{fo}}$	燃油密度	$\text{kg}/\text{m}^3$	适用于液体燃料
250	$\mu_{\text{as}}$	气体燃料含灰量	$\text{g}/\text{m}^3$	适用于气体燃料
251	$\omega$	饱和蒸汽湿度	%	
252	$\eta$	锅炉热效率	%	
253	$\eta_{\text{de}}$	锅炉设计热效率	%	
254	$\eta_{\text{in}}$	冷凝器热效率	%	
255	$\eta_{\text{net}}$	锅炉净效率	%	
256	$\eta_{\text{SO}_2}$	脱硫效率	%	
257	$\eta_1$	正平衡效率	%	
258	$\eta_2$	反平衡热效率	%	
259	$\eta_{1.2}$	锅炉平均热效率	%	

注：气体(燃气、烟气、空气)单位符号“ $\text{m}^3$ ”的意义为：在 101 325 Pa 大气压力、0 °C 状态下测得的体积，且体积单位为立方米，简称“标准立方米”。

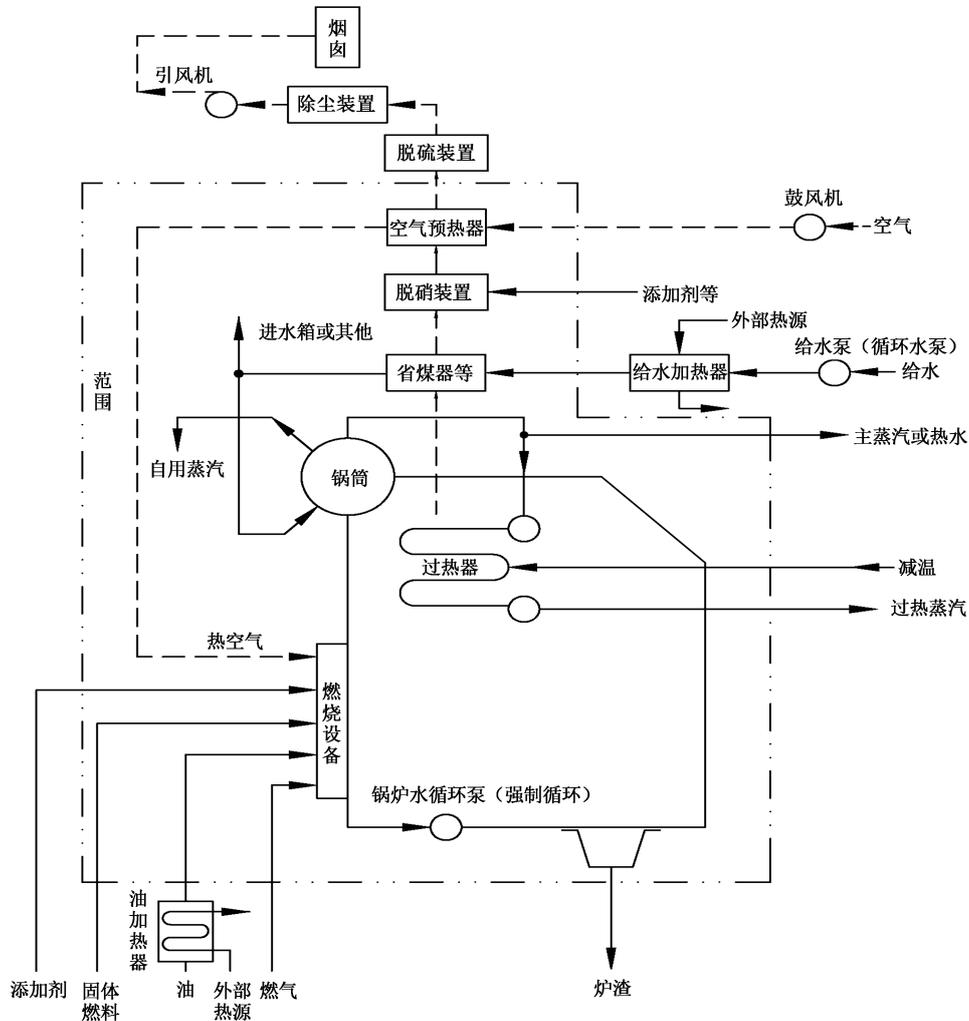
## 5 总则

5.1 本标准规定进行热工性能试验的锅炉热平衡系统边界见图 1。在具体情况下，锅炉热平衡系统边界不尽相同，可根据下列情况协商修改锅炉热平衡系统边界并调整相应的测量项目：

- a) 对于锅炉热平衡系统边界内有两种或两种以上的被加热工质时，应分别测量和计算不同工质

的有效吸收热量,并将其累加作为锅炉正平衡热效率计算时的有效吸收热量。

- b) 对于锅炉尾部安装有余热利用装置时,如回收的热量全部直接进入锅炉(如省煤器),应按常规锅炉进行试验;如回收的热量先进入水箱再进入锅炉或另作他用,则应按 5.1a) 进行处理。
- c) 对于锅炉热平衡系统边界内发生烟气冷凝且热量回收利用时,应分别测量锅炉本体和烟气冷凝段的有效吸收热量。锅炉热效率计算方法参照附录 A。
- d) 对于锅炉同时燃烧不同燃料时,应分别对各燃料的消耗量进行测量并采样化验,燃料消耗量测量方法及要求按 9.2.1、9.2.2、9.2.3,采样方法及要求按 9.3.1、9.3.2、9.3.3 等。在数据计算时,可根据各燃料的元素分析数据、工业分析数据、发热值和全水分数据再按各燃料的消耗量加权求得混合燃料的化学成分和低位发热值等,然后作为单一燃料处理。计算方法按 GB/T 10184 的相关规定。
- e) 对于垃圾焚烧锅炉,其进风口一般设在垃圾堆上方。在试验时,除有特殊要求,进风所带入的微量可燃气体的热量可忽略不计。
- f) 对于锅炉在热平衡系统边界内添加脱硫剂进行脱硫时,应测量和计算其对锅炉热效率的影响。
- g) 对于锅炉在热平衡系统边界内添加脱硝剂进行脱硝时,一般可忽略其对锅炉出力和热效率的影响。当有特殊要求时,可按 GB/T 10184 测量、计算其对锅炉出力和热效率的影响。



注：双点划线内为锅炉热平衡系统边界,虚线为烟风系统。

图 1 锅炉热平衡系统边界

5.2 输出热量、输入热量及其他有关热量(包括计算锅炉热效率时的外来热量)的构成在图 2 中示出。采用燃料的收到基低位发热值来确定燃料的输入热量。

5.3 锅炉热效率为不扣除自用蒸汽和辅机设备耗用动力折算热量的毛效率。必要时,可进行锅炉净效率计算,但自用蒸汽量和辅机设备用动力在试验时应予以记录。

5.4 锅炉热效率的测量应同时采用正平衡测量法和反平衡测量法,锅炉热效率值取正平衡测量法与反平衡测量法测得结果的平均值。当符合如下条件时,可仅采用一种方法测量,其测得的锅炉热效率平均值即为该锅炉的热效率值:

- a) 额定蒸发量(额定热功率)大于或等于 10 t/h(7 MW)的燃固体燃料锅炉和垃圾焚烧锅炉,可仅用反平衡测量法测量锅炉热效率;
- b) 手烧锅炉、下饲式锅炉、电加热锅炉可仅用正平衡测量法测量锅炉热效率;
- c) 对于锅炉热平衡系统边界内发生烟气冷凝且热量回收利用的锅炉试验时,锅炉本体部分应采用正反平衡测量法,冷凝段部分可仅采用正平衡测量法,然后计算锅炉热效率。

5.5 蒸汽锅炉的出力由折算蒸发量来确定,并应扣除锅水取样量。

5.6 有机热载体(导热油)的比热容应取其实测温度下的进、出口有机热载体的比热容与 0 °C 时的比热容的平均值。

5.7 锅炉热工性能试验的基准环境温度为鼓(送)风机进口处的空气温度。如有多个鼓(送)风机,应选取风量最大的鼓(送)风机进风口处的空气温度。

5.8 在试验过程中或整理试验数据时,如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试验规定的范围;
- b) 试验工况中主要热力参数波动超出试验规定的范围;
- c) 某一主要测量项目的试验数据有 1/3 以上出现异常或矛盾。

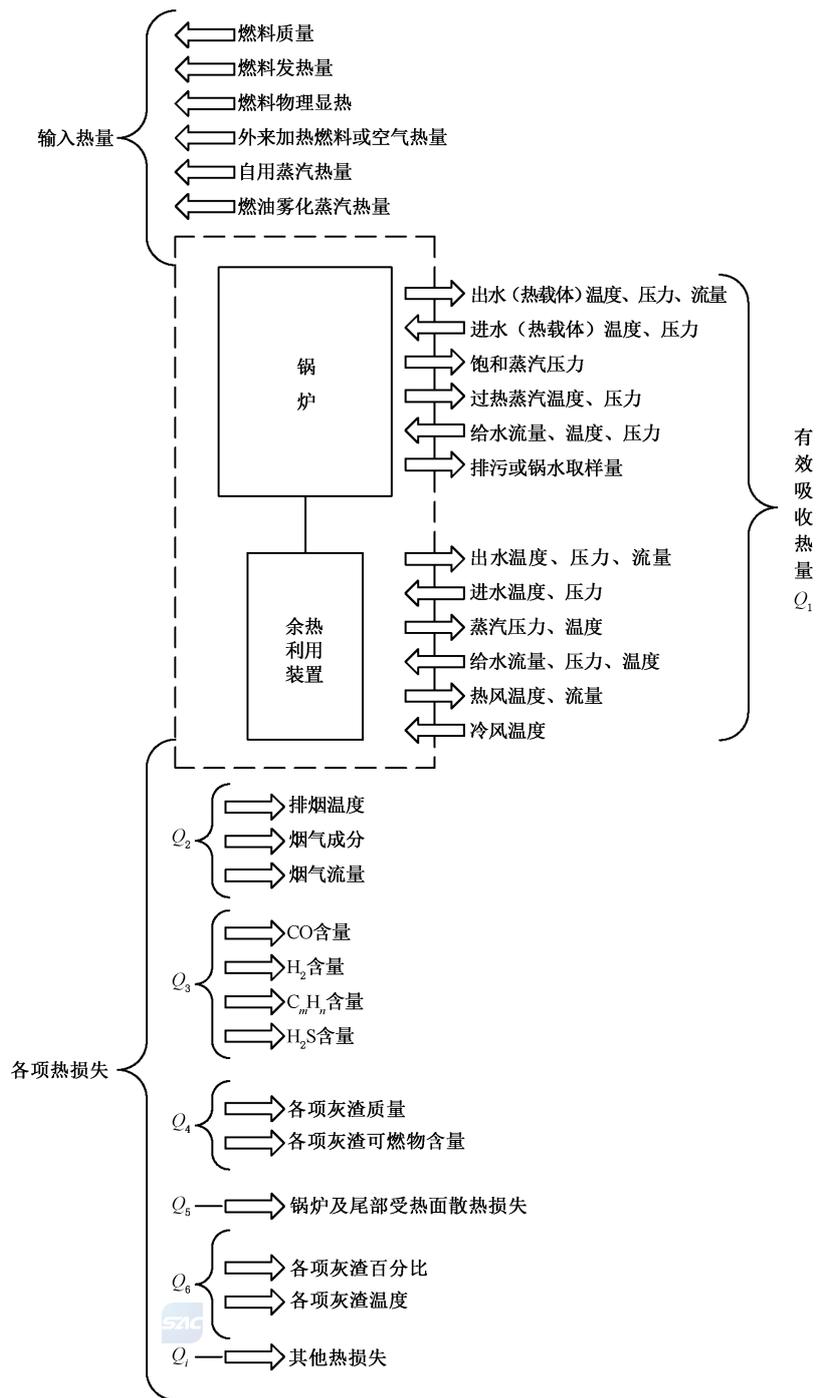


图 2 锅炉热量平衡图

## 6 试验准备

6.1 锅炉试验前应结合具体情况制定试验大纲。试验大纲至少应包括如下内容：

- 试验目的和要求；
- 锅炉热平衡系统边界、测量项目、测量方法及要求；

- c) 测点布置与所需仪器、仪表；
- d) 人员组织与分工；
- e) 试验数据记录与处理；
- f) 试验进度及日程安排；
- g) 其他。

#### 6.2 试验前的要求如下：

- a) 试验所用仪表应是在检定或校准有效期内的合格仪表；
- b) 试验用仪器仪表的安装应符合试验要求及相应仪器仪表的安装要求；
- c) 受试锅炉及辅机设备的运行状况应符合试验要求；
- d) 受试锅炉的汽、水及燃料、排渣等系统应符合试验要求。

#### 6.3 预备性试验的要求如下：

- a) 试验人员应熟悉试验过程和操作程序并在试验过程中相互配合；
- b) 锅炉的试验运行工况稳定，试验用仪器仪表应工作正常；
- c) 预备性试验的试验条件、试验内容和试验要求应与正式试验相同；如预备性试验能满足正式试验全部要求，经双方确认，可作为正式试验的一个工况。

## 7 试验要求

### 7.1 定型试验

7.1.1 试验应在锅炉主要热力参数(工质出口温度、压力、流量)调整到试验允许范围且工况稳定 1 h 后进行。

7.1.2 试验工况要求如下：

- a) 锅炉主要热力参数的最大允许波动范围应符合表 2 要求。

表 2 锅炉主要热力参数的最大允许波动范围

参数名称	允许偏差	要求	
输出蒸汽量 (即锅炉实测蒸汽量) $D_{out}/(\text{kg/h})$	$D_{no} \leq 10\,000$	$\pm 10\% D_{no}$	—
	$10\,000 < D_{no} \leq 20\,000$	$\pm 9\% D_{no}$	—
	$20\,000 < D_{no} \leq 40\,000$	$\pm 8\% D_{no}$	—
	$40\,000 < D_{no} \leq 80\,000$	$\pm 7\% D_{no}$	—
	$80\,000 < D_{no} \leq 140\,000$	$\pm 6\% D_{no}$	—
	$D_{no} > 140\,000$	$\pm 5\% D_{no}$	—
实测蒸汽压力(表压) $P_{am}/\text{MPa}$	$P_{no} < 1.0$	$-15\% P_{no}$	试验期间工质工作压力的最大值和最小值之差不应大于额定压力的 10%
	$1.0 \leq P_{no} \leq 1.6$	$-10\% P_{no}$	
	$1.6 < P_{no} \leq 2.5$	$-8\% P_{no}$	
	$2.5 < P_{no} < 3.8$	$-5\% P_{no}$	
过热蒸汽温度 $t_{st,sh,lv}/\text{℃}$	$t_{r,st} \leq 250$	$-20\text{℃}, +30\text{℃}$	每个试验工况中,实测的过热蒸汽温度的最大值与最小值之差不应大于 15℃
	$250 < t_{r,st} \leq 350$	$-20\text{℃}, +20\text{℃}$	
	$350 < t_{r,st} \leq 400$	$-20\text{℃}, +10\text{℃}$	
	$t_{r,st} > 400$	$-15\text{℃}, +5\text{℃}$	

表 2 (续)

参数名称	允许偏差	要求
<p>注 1: <math>D_{no}</math> 为受试锅炉在试验工况时的名义蒸发量(kg/h)。定型试验时为锅炉额定蒸发量;运行或验收试验时为相关方约定的试验工况出力。</p> <p>注 2: <math>P_{no}</math> 为受试锅炉在试验工况时的名义工质(蒸汽)压力(MPa)。定型试验时为锅炉额定压力;运行或验收试验时为相关方约定的试验工况压力。</p> <p>注 3: <math>t_{r,st}</math> 为额定蒸汽温度(°C)。</p>		

- b) 蒸汽锅炉的实际给水温度与设计值的偏差宜控制在 +30 °C ~ -20 °C 之间。当实际给水温度与设计值的偏差超过 -20 °C 时,测得的锅炉热效率应按每相差 -60 °C 热效率值下降 1 个百分点进行折算,大于或小于 -60 °C,则按比例折算,并在试验结果分析中对此予以扣除(对于无省煤器的锅炉则不予扣除)。
- c) 热水锅炉的进水温度和出水温度与设计值的偏差不宜超过 ±5 °C。当实际出水温度平均值与设计值的偏差超过 -5 °C 时,应对测得的锅炉热效率进行折算。对于燃煤锅炉,出水温度与设计值相差 -15 °C,则热效率值下降 1 个百分点;对燃油、燃气锅炉,出水温度与设计值相差 -25 °C,则热效率值下降 1 个百分点。大于或小于上述温度时,按比例折算。对既有省煤器又有空气预热器的锅炉则不予扣除。
- d) 试验时热水锅炉的压力应保证出水温度比该压力下的饱和温度至少低 20 °C。
- e) 试验期间安全阀不应启跳,锅炉不应吹灰,不应定期排污,连续排污一般也应关闭。对过热蒸汽锅炉,当必须连续排污时,连续排污量应计量(计入锅水取样量内),其数值不应超过锅炉出力的 3%。
- f) 对于燃煤锅炉,试验期间过量空气系数、给煤量、给水流量、炉排速度、煤层或沸腾燃烧锅炉料层高度等应保持基本稳定;对于燃油燃气锅炉,试验期间过量空气系数、燃料供给流量、给水流量等应保持基本稳定。
- g) 定型试验时试验燃料应满足设计要求。当试验燃料与设计燃料在发热值、灰分、水分、颗粒度等存在可接受的偏差时,在征得试验各方同意的情况下,可对热效率值按修正曲线进行修正,修正曲线由锅炉制造方提供并应得到试验各方确认。

7.1.3 试验结束时,锅筒水位和煤(料)斗的煤(料)位均应与试验开始时一致,如煤(料)斗中的煤(料)位不一致应进行修正。对于手烧锅炉和下饲式锅炉,在试验开始前和试验结束前均应进行一次清炉,且试验结束与开始时,煤(料)层厚度和燃烧状况应基本一致。

7.1.4 正式试验时,每个试验工况的时间应符合表 3 的规定。

表 3 锅炉试验工况时间

锅炉类型	试验工况时间/h
手烧锅炉、下饲式锅炉	≥5(至少一个完整出渣周期)
层状燃烧、悬浮燃烧、流化床燃烧的固体燃料锅炉	≥4
水煤浆、石油乳化焦浆及其他类似燃料锅炉	
燃油等液体燃料和气体燃料锅炉	≥2
电加热锅炉	≥1

7.1.5 试验工况数及蒸发量修正方法如下:

- a) 锅炉定型试验应在额定出力下进行 2 个工况；
- b) 对于水煤浆燃烧锅炉和煤粉燃烧锅炉还应进行一次不大于 70% 额定出力下的燃烧稳定性试验, 时间为 4 h, 一般采用正平衡测量法测量锅炉热效率, 但对额定蒸发量(额定热功率)大于或等于 10 t/h(7 MW) 锅炉, 可采用反平衡测量法测量锅炉热效率；
- c) 定型试验时蒸汽锅炉每个试验工况的平均折算蒸发量应为锅炉额定蒸发量的 97%~105%。  
当蒸汽和给水参数实测值与设计值不一致时, 锅炉的蒸发量按式(1)或式(2)进行修正。

对于饱和蒸汽锅炉：

$$D_{\text{con}} = D_{\text{out}} \frac{h_{\text{sat, st}} - h_{\text{fw}}}{h_{\text{sat, st}}^* - h_{\text{fw}}^*} \dots\dots\dots (1)$$

对于过热蒸汽锅炉：

$$D_{\text{con}} = D_{\text{out}} \frac{h_{\text{st, sh, lv}} - h_{\text{fw}}}{h_{\text{st, sh, lv}}^* - h_{\text{fw}}^*} \dots\dots\dots (2)$$

式中：

- $D_{\text{con}}$  —— 锅炉折算蒸发量, 单位为千克每小时(kg/h)；
- $D_{\text{out}}$  —— 输出蒸汽量(即锅炉实测蒸发量), 单位为千克每小时(kg/h)；
- $h_{\text{sat, st}}$  —— 饱和蒸汽焓, 单位为千焦每千克(kJ/kg)；
- $h_{\text{fw}}$  —— 给水焓, 单位为千焦每千克(kJ/kg)；
- $h_{\text{sat, st}}^*$  —— 设计参数下饱和蒸汽焓, 单位为千焦每千克(kJ/kg)；
- $h_{\text{fw}}^*$  —— 设计参数下给水焓, 单位为千焦每千克(kJ/kg)；
- $h_{\text{st, sh, lv}}$  —— 过热蒸汽焓, 单位为千焦每千克(kJ/kg)；
- $h_{\text{st, sh, lv}}^*$  —— 设计参数下过热蒸汽焓, 单位为千焦每千克(kJ/kg)。

7.1.6 有机热载体锅炉的试验可按热水锅炉的试验方法和要求进行。当有机热载体进出温度与设计值的偏差超出 $\pm 5^\circ\text{C}$ 时, 锅炉热效率折算可按 7.1.2 c) 进行。

## 7.2 运行试验

锅炉运行试验分为锅炉运行工况热效率简单测试和锅炉运行工况热效率详细测试。相应的试验要求和方法按附录 B。

## 7.3 验收试验

锅炉验收试验应由验收相关方(通常包括锅炉供货方、使用方、第三方检测机构等)协商确定有关试验要求, 如燃料特性、锅炉运行出力、压力、温度等参数及波动范围、热效率折算等。第三方检测机构应按验收相关方协商一致的结果, 采用本标准规定的方法进行试验。

## 8 测量项目和试验用仪器仪表

### 8.1 主要测量项目

8.1.1 锅炉热工性能主要包括：

- a) 锅炉热效率；
- b) 蒸发量或输出热功率；
- c) 蒸汽温度与蒸汽品质；
- d) 工质进出口温度；
- e) 工作压力；
- f) 过量空气系数；

- g) 排烟温度与入口空气温度；
- h) 燃料消耗量；
- i) 空气和烟气流量；
- j) 灰渣等可燃物含量；
- k) 其他热损失等指标。

8.1.2 根据图 1、图 2，工业锅炉热工性能试验主要测量项目见表 4，但可不受限于表 4 所列的项目。如需对锅炉进行热工性能分析或计算锅炉净效率，还应进行表 5 所列项目的测量。

表 4 锅炉热工性能试验主要测量项目

序号	名称	备注
1. 燃料及灰渣测量与采样		
1)	燃料消耗量及采样	电加热锅炉为用电量
2)	炉渣、漏煤、烟道灰、溢流灰、冷灰、飞灰、循环灰的质量	—
3)	炉渣、漏煤、烟道灰、溢流灰、冷灰、飞灰、循环灰的采样	—
4)	添加剂消耗量及采样	—
2. 流量测量		
1)	蒸汽锅炉给水流量	—
2)	过热蒸汽流量	—
3)	热水锅炉循环水(油)量	—
4)	自用蒸汽量	—
5)	排污量	连续排污量,计入锅水采样量
6)	蒸汽采样量	—
7)	锅水采样量	—
8)	余热利用装置工质流量	—
3. 温度测量		
1)	锅炉给水温度	—
2)	过热蒸汽温度	—
3)	热水(热载体)锅炉进、出口水(油)温	—
4)	入炉冷空气温度	—
5)	排烟温度	—
6)	液体燃料温度	—
7)	炉渣温度	—
8)	烟道灰温度	—
9)	溢流灰温度	—
10)	循环灰温度	—
11)	漏煤温度	—
12)	冷灰温度	—

表 4 (续)

序号	名称	备注
13)	炉体(包括锅炉标准构成范围内的余热回收装置、烟道和水箱等部件)外表面温度	—
14)	余热利用装置工质进、出口温度	—
15)	余热利用装置进、出口烟温	—
16)	燃烧器前油、气温度	—
4. 压力测量		
1)	蒸汽压力	—
2)	给水压力	—
3)	热水锅炉进、出水压力	—
4)	有机热载体锅炉进、出油压力	—
5. 烟气成分测量		
1)	$RO_2$ (即: $CO_2 + SO_2$ ) 含量	—
2)	$O_2$ 含量	—
3)	CO 含量	—
4)	$H_2$ 含量	—
5)	$H_2S$ 含量	—
6)	$C_m H_n$ 含量	—
7)	$NO_x$ 含量	—
6. 分析与化验项目		
1)	固体燃料或液体燃料元素分析、工业分析	—
2)	液体燃料密度、含水量	—
3)	气体燃料组成成分	—
4)	混合燃料组成成分	—
5)	燃料收到基低位发热值	—
6)	炉渣含水量	—
7)	炉渣、漏煤、烟道灰、溢流灰(沉降灰)、冷灰、飞灰、循环灰可燃物含量	—
8)	有机热载体特性分析	—
9)	饱和蒸汽湿度	—
10)	过热蒸汽含盐量	—
7. 其他测量项目		
1)	散热面积	—
2)	试验开始与结束时间	—
3)	鼓(送)风机进口处空气温度	—
4)	锅炉使用地大气压力	—

表 5 锅炉热工性能分析用测量项目

序号	名称	备注
1. 燃料特性测量		
1)	煤粉细度和灰熔点	当受试锅炉为煤粉锅炉或流化床锅炉时
2)	燃料粒度组成	当受试锅炉为流化床锅炉时或当受试锅炉为层状燃烧锅炉需要了解燃料颗粒分布时
3)	重油黏度、凝固点	当受试锅炉以重油为燃料时
2. 压力测量		
1)	炉膛压力	—
2)	燃烧器前油、气压力	—
3)	一次风压或流化床燃烧锅炉风室风压	—
4)	二次风压	—
5)	烟道各段压力	—
3. 温度测量		
1)	沸腾层温度	当受试锅炉为流化床锅炉时
2)	炉膛出口烟气温度	—
3)	空气预热器进、出口烟温和热风温度	—
4. 辅机用电量测量		
1)	鼓(送)风机(一、二次风机)电机功率	—
2)	引风机电机功率	—
3)	破碎机电机功率	—
4)	筛分机电机功率	—
5)	磨煤机电机功率	—
6)	给煤机电机功率	—
7)	炉排传动装置(电机)功率	—
8)	给水泵(循环水泵、热载体循环泵)电机功率	—
9)	燃烧器电功率	—
10)	燃油加热器电功率	—
11)	其他	—

## 8.2 试验用仪器、仪表

8.2.1 试验时所用的仪器、仪表应在检定或校准的合格有效期内。

8.2.2 所用仪器、仪表在测量量程内应满足测量项目的精度要求,主要测量项目所用仪器、仪表的精度应符合表 6 的规定。

8.2.3 仪器、仪表的安装及使用应符合试验要求及仪器、仪表的使用要求。

表 6 主要测量项目用仪器、仪表的精度要求

序号	测量项目		仪器和仪表的最低精度要求
1	质量测定	衡器	Ⅲ级
2	用电量测量	电度表	1.0级
		互感器	0.5级
3	流量测量	液体燃料流量	0.5级
		气体燃料流量	1.5级
		其他工质(不含空气和烟气)流量	1.0级
4	温度测量		0.5级 [采用热电阻温度计时精度应不低于B级,且其显示仪表(二次仪表)的读数分辨率应不低于0.1℃]
5	压力测量	工质压力	1.6级
6	烟气成分测量	O <sub>2</sub> 、RO <sub>2</sub> (即:CO <sub>2</sub> +SO <sub>2</sub> )含量	1.0级
		CO、H <sub>2</sub> 、H <sub>2</sub> S、C <sub>m</sub> H <sub>n</sub> 、NO <sub>x</sub> 等含量	5.0级
7	长度测量		1.0级
8	空气、烟气的压力和流量测量		1.5级
9	蒸汽湿度和含盐量测量		1.0级

## 9 试验方法

### 9.1 试验数据记录

- 9.1.1 热水锅炉进、出口工质(热水、有机热载体)温度,应每不大于5 min读数并记录一次。
- 9.1.2 工质流量的测量采用累计(积)方法确定时,应每不大于30 min读数并记录一次。
- 9.1.3 需要称重的测量项目,时间间隔按实际操作进行记录。
- 9.1.4 蒸汽湿度和含盐量测量应每不大于30 min测量并记录一次。
- 9.1.5 其他测量项目,一般应每不大于15 min测量并记录一次。

### 9.2 燃料及添加剂的测量

#### 9.2.1 固体燃料

- 9.2.1.1 固体燃料消耗量应使用衡器进行测量,一般在加入料斗、料仓或皮带输送机之前进行测量。人工加料时,燃料应与盛放燃料的容器一起称重并逐一记录。盛放燃料的容器应精确称重,并每隔一段时间(如1 h)复校一次。
- 9.2.1.2 在燃料称重计量开始和结束时,应对锅炉料斗或料仓进行平仓,使料斗或料仓里的燃料剩余量在计量开始与计量结束时保持一致。

#### 9.2.2 液体燃料

- 9.2.2.1 液体燃料消耗量可使用衡器、液体流量计进行测量,也可采用容器测量。

9.2.2.2 液体燃料消耗量采用衡器测量时,燃料应与盛放燃料的容器一起测量并逐一记录,盛放燃料的容器应精确测量,并每隔一段时间(如 1 h)复校一次;采用容器测量时,容器上应带有液位计,且容器应经过验证,误差不应低于流量计的精度要求。

### 9.2.3 气体燃料

9.2.3.1 气体燃料消耗量一般采用气体流量计进行测量,液化石油气/天然气也可使用衡器进行测量。

9.2.3.2 在测量气体流量时,应在流量计附近同时测量气体的压力和温度。

### 9.2.4 添加剂

固体、液体、气体添加剂消耗量的测量分别按 9.2.1、9.2.2、9.2.3 的相关要求进行;当仅进行反平衡测量时,入炉添加剂的消耗量可通过校核添加剂给料机等方法进行测量。

## 9.3 燃料及添加剂的采样

### 9.3.1 固体燃料

9.3.1.1 入炉煤、煤粉的采样和制备方法按附录 C;生物质固体燃料的采样按附录 C 或 NY/T 1879,样品制备按 GB/T 28730 或 NY/T 1880;垃圾作为锅炉燃料时,其采样按 CJ/T 313。

9.3.1.2 入炉煤的采样应在称重点点进行。每个试验采集的煤样质量应不少于总燃煤消耗量的 1%,且采样总量不少于 10 kg。当锅炉额定蒸发量(额定热功率)大于或等于 20 t/h(14 MW)时,采集的煤样质量应不少于总燃料消耗量的 0.5%。

9.3.1.3 以煤粉、生物质固体成型燃料、水煤浆、垃圾为试验燃料时,试验过程中应进行多次采样,混合后进行化验;燃用其他固体燃料时应按每个工况分别进行采样和化验。

### 9.3.2 液体燃料

液体燃料的采样一般在燃烧器前的燃料输送管道上进行,也可在盛放燃料的容器内进行,但不宜从容器底部排污口进行采样。采样时间和采样量应均匀,且在试验开始后 0.5 h 内和结束前 0.5 h 内各取一次样,总采样次数不应少于三次,总采样量应不少于 1 L。所有样品混合均匀后分别装入 2 个容器内,加盖密封,一份用于化验,一份保存备查。

### 9.3.3 气体燃料

气体燃料的采样可在减压(调节)阀后的燃气管道上或在燃烧器前的燃气管道上进行,一般在管道上装设一个带阀门的采样管,接上采样器(袋)进行采样。城市煤气及天然气的成分和发热值也可由供气方提供。当同时有采样分析化验数据和供气方提供的数据且二者不一致时,应以采样分析化验数据为准。



### 9.3.4 添加剂

固体、液体、气体添加剂的采样分别按 9.3.1、9.3.2、9.3.3 中相关要求进行了。

### 9.3.5 采样时间

样品采样有效时间与锅炉试验工况时间相同,但采样开始和结束的时间应视燃料从采样点到送入炉膛所需的时间适当提前,以保证样品能代表试验期间所用燃料。样品采集后应立即密封保存。

## 9.4 灰渣量的测量及采样

### 9.4.1 测量要求

9.4.1.1 试验过程中可在被测锅炉灰渣出口处,将灰渣与容器一并测量并逐一记录测量数据,每隔一段时间(如 1 h)应复校一次容器质量。

9.4.1.2 在湿法出渣且含有大量水分时,应将灰渣铺开在清洁的地面上,待稍干除湿后再称量。炉渣一般应逐车称量,若漏煤、烟道灰、溢流灰、冷灰等有多出渣(灰)口时,应对每个出渣(灰)口的灰渣进行单独称量。

9.4.1.3 飞灰一般不需计量,可通过灰平衡计算得出。由于锅炉结构等原因造成某项灰渣质量无法测量时,也应对飞灰质量进行测量。飞灰测量可在除尘器前的烟道内进行等速采样并计算测量结果,测点应开设在烟道直段上截面工质流速比较均匀的位置,采样点前、后烟道应分别保持 6 倍直径(当量)和 3 倍直径(当量)的直段,采样按附录 D 规定的网格法等面积原则进行。

### 9.4.2 采样要求

9.4.2.1 炉渣和冷灰采样应与称量同时进行。可在炉渣和冷灰出口处定期采样,一般为每车采样一次。采样和缩分方法见附录 C。每个试验工况原始炉渣和冷灰采样质量应不少于总炉渣和冷灰质量的 2%;当煤的灰分  $A_d \geq 40\%$  时,原始采样质量应不少于总炉渣和冷灰质量的 1%,且原始炉渣和冷灰采样总质量应不少于 20 kg;当总炉渣量少于 20 kg 时,应予全部采样。缩分后炉渣和冷灰样品质量应不少于 3 kg。所采样品分别装入 2 个容器内,加盖密封,一份用于化验,一份保存备查。

9.4.2.2 烟道灰、溢流灰、漏煤、循环灰的采样应在每次出灰时进行,采样方法与炉渣采样相同。如有多个出灰口,应在各出灰口分别进行采样,并将各自采样按照各出灰口的灰量进行加权混合。缩分后烟道灰、溢流灰、漏煤、循环灰样品质量应各不少于 1 kg。所采样品分别装入 2 个容器内,加盖密封,一份用于化验,一份保存备查。如样品需做全水分化验,则样品质量应各不少于 3 kg。

9.4.2.3 当锅炉额定蒸发量(额定热功率)小于或等于 10 t/h(7 MW)时,其飞灰的采样可在除尘器的出灰口进行,方法如下:

- a) 对于干式除尘器,试验前应先清理除尘器内的积灰,试验结束后,打开除尘器出灰口,放出飞灰,采样并缩分到不少于 0.5 kg,分别装入 2 个容器内,加盖密封,一份用于化验,一份保存备查;
- b) 对于湿式除尘器,可在试验过程中,定时用容器在除尘器的出水口处连水带灰采样,让其自然沉淀后倒水、取出飞灰;待试验结束,把采样飞灰缩分至不少于 0.5 kg,分别装入 2 个容器内,加盖密封,一份用于化验,一份保存备查。

9.4.2.4 当锅炉额定蒸发量(额定热功率)大于 10 t/h(7 MW)或配有多级除尘器时,可在除尘器前的烟道上按附录 D 的网格法等面积原则进行采样。

## 9.5 流量测量

### 9.5.1 一般要求

9.5.1.1 采用的流量计应适应被测工质的温度要求。

9.5.1.2 采用容器测量时,其上应带有液位计。容器应经过验证,且误差不应低于流量计的精度要求。

### 9.5.2 蒸汽锅炉给水流量

9.5.2.1 蒸汽锅炉蒸发量一般通过测量锅炉给水流量来确定。采用流量计测量锅炉给水流量时,测点通常布置在给水泵后给水管道的直段上,并尽量与给水温度和给水压力测点处于同一区域。

9.5.2.2 给水流量也可采用容器(如水箱)进行测量,容器应带有满足精度要求的液位计,并且容积应能满足一个试验工况的用水量要求。

9.5.2.3 试验过程中存在锅水取样和蒸汽取样时,应对取样量进行计量。锅水取样计量的器具精度不应低于Ⅲ级;蒸汽取样计量的器具精度不应低于Ⅲ级。

9.5.2.4 当采用测量锅炉给水流量来确定锅炉蒸发量时,试验开始时应对锅炉水位计进行标记,以保证试验开始和结束时锅内的水位处于同一水位线。

### 9.5.3 过热蒸汽流量

过热蒸汽锅炉蒸发量可采用直接测量过热蒸汽流量来确定。过热蒸汽流量测点一般布置在主蒸汽管道的直段上。

### 9.5.4 热水(有机热载体)锅炉循环水(有机热载体)量

热水(有机热载体)锅炉循环水(有机热载体)量测点应布置在管道的直段上。

## 9.6 温度测量

### 9.6.1 一般要求

9.6.1.1 测温仪表应符合试验要求。

9.6.1.2 工质温度测点应选择在被测工质温度分布比较均匀的位置。

### 9.6.2 蒸汽锅炉给水温度

蒸汽锅炉给水温度测点一般布置在给水管道上,测温仪表的测温端应插至给水管道截面的 $1/3\sim 2/3$ 处。对于管道保温良好的锅炉,也可在水箱或除氧器内测量给水温度。

### 9.6.3 过热蒸汽温度

过热蒸汽温度测点应布置在主蒸汽管道上,测温仪表的测温端应插至主蒸汽管道截面的 $1/3\sim 2/3$ 处。

### 9.6.4 热水(有机热载体)锅炉进、出水(有机热载体)温度

热水(有机热载体)锅炉进、出水(有机热载体)温度测点应布置在进、出水(有机热载体)管道上,测温仪表的测温端应插至管道截面的 $1/3\sim 2/3$ 处。

### 9.6.5 入炉冷空气温度

入炉冷空气温度测点应设在鼓(送)风机进风口处。如有多个鼓(送)风机,测点应选在风量最大的鼓(送)风机进风口处。

### 9.6.6 排烟温度

9.6.6.1 排烟温度测点应设在烟道截面上工质温度比较均匀的位置,并应接近最后一级受热面,且距离应不大于1 m。

9.6.6.2 测温仪表的测温端应插至烟道直径(当量)的 $1/3\sim 2/3$ 处。当锅炉额定蒸发量(额定热功率)大于或等于20 t/h(14 MW)、烟道截面较大时,排烟温度应进行多点测量,一般可在同一截面上布置2个~3个测点,取其算术平均值作为锅炉的排烟温度;当锅炉额定蒸发量(额定热功率)大于或等于130 t/h(91 MW)时,应采用网格法测量,网格法等面积划分原则见附录D。

### 9.6.7 灰渣温度

9.6.7.1 冷灰、烟道灰、循环灰温度可在放出的灰堆中进行测量,测温仪表的测温端应尽量处于灰堆的重心位置,每堆测量 2 次~3 次。试验结束后,根据每堆灰的质量,对试验数据进行加权平均,作为试验的结果数据。

9.6.7.2 当锅炉配备冷渣器时,灰渣温度应在冷渣器出灰口处测量。冷渣器中的冷却水吸收的热量应计入锅炉有效吸收热量。

9.6.7.3 当炉渣、冷灰和漏煤温度无法测量时,层状燃烧锅炉的炉渣温度按 600 °C 选取,循环流化床锅炉的冷灰(无冷渣器)温度按 800 °C 选取,煤粉锅炉的炉渣温度按 800 °C 选取,漏煤温度按 50 °C 选取。

### 9.7 压力测量

9.7.1 锅炉蒸汽压力、给水压力、热水(有机热载体)锅炉进水(有机热载体)和出水(有机热载体)压力,可采用压力表进行测量。饱和蒸汽锅炉蒸汽压力的测点应布置在锅筒或锅壳的汽空间内,过热蒸汽锅炉蒸汽压力的测点应布置在过热蒸汽主管道上,热水(有机热载体)锅炉工质压力测点应布置在进、出水(有机热载体)管道上。

9.7.2 风机风压、锅炉风室风压,烟、风道各段烟气、风压力,以及烟、风道各段烟、风流速的测点应布置在风道或烟道截面上流速和压力分布比较均匀的位置。当锅炉额定蒸发量(额定热功率)大于或等于 130 t/h(91 MW)时,应采用网格法测量,网格法等面积划分原则见附录 D。

### 9.8 烟气成分测量

9.8.1 锅炉烟气成分测量项目主要包括烟气中三原子气体[ $RO_2$ (即: $CO_2 + SO_2$ )]含量、氧气( $O_2$ )含量、一氧化碳(CO)含量、氢气( $H_2$ )含量、硫化氢( $H_2S$ )含量、碳氢化合物( $C_m H_n$ )含量。需要时,可测量氮氧化物( $NO_x$ )含量等。

9.8.2 当锅炉使用特殊燃料或进风(如富氧燃烧),被测气体中含氧量超出烟气分析仪的量程时,应采用奥氏分析仪进行测量分析。奥氏分析仪的使用见附录 E。

9.8.3 烟气成分测点应开设在烟道截面上工质流速比较均匀的位置,一般在直管段上,并应接近最后一级受热面,距离不大于 1 m。烟气成分和排烟温度测量可采用同一个测点;当二者采用不同测点时,烟气成分测点应更靠近最后一级受热面。

9.8.4 烟气取样管端部应插至烟道直径(当量)的 1/3~2/3 处。当锅炉额定蒸发量(额定热功率)大于或等于 20 t/h(14 MW)、烟道截面较大时,可采用笛型采样管进行采样,也可采用网格法采样,网格法等面积划分原则见附录 D。

### 9.9 用电量测量

电加热锅炉的用电量、锅炉各辅机的用电量可采用符合要求的仪器和仪表进行测量,测点一般布置在锅炉动力柜中。

### 9.10 散热损失的测量与计算

锅炉本体及部件外表面散热损失测量与计算应按附录 F 的规定进行。

### 9.11 饱和蒸汽湿度和过热蒸汽含盐量的测量

9.11.1 饱和蒸汽湿度和过热蒸汽含盐量的测量按附录 G 的规定进行。

9.11.2 在用工业锅炉运行工况热效率测试时,若现场无合适的蒸汽和锅水采样装置且无加装条件时,饱和蒸汽湿度可按 NB/T 47034 对工业锅炉额定工况下蒸汽品质要求的最低值选取,水管锅炉蒸汽湿

度取 3%，水火管锅炉和锅壳锅炉蒸汽湿度取 4%。

9.12 燃料、灰、渣及添加剂的化验分析

9.12.1 煤及其燃烧后的灰、渣的化验分析应按 GB/T 211、GB/T 212、GB/T 213、GB/T 214、GB/T 476、GB/T 19227、GB/T 25214、GB/T 30732、GB/T 30733 的规定方法进行。

9.12.2 燃油的化验分析应按 GB/T 260、GB/T 384、GB/T 508、GB/T 1884、DL/T 567.8、DL/T 567.9 的规定方法进行。

9.12.3 燃气的化验分析应按 GB/T 10410 和 GB/T 13610 的规定方法进行。

9.12.4 生物质固体燃料的化验分析应按 GB/T 28731、GB/T 28732、GB/T 28733、GB/T 28734、GB/T 30725、GB/T 30726、GB/T 30727、GB/T 30728、NY/T 1881.1~NY/T 1881.5 的规定方法进行。

9.12.5 生活垃圾的化验分析应按 CJ/T 313 规定的方法进行。

9.12.6 脱硫用添加剂的化验分析应包括：CaCO<sub>3</sub>、MgCO<sub>3</sub>、水分和杂质含量。如果需要，还应分析脱硫剂的颗粒粒径分布，分析方法按 GB/T 3286(所有部分)和 GB/T 6284 的规定。其他添加剂的化验分析按相关标准。

9.13 有机热载体的化验分析

有机热载体的化验分析应按 GB 23971、GB/T 24747 的相关规定进行。

10 锅炉热效率的计算



10.1 单一工质锅炉热效率的计算

10.1.1 采用正平衡测量法时锅炉热效率的计算

10.1.1.1 输入热量计算按式(3)进行：

Q<sub>in</sub> = Q<sub>net,v,ar</sub> + Q<sub>ex</sub> + Q<sub>f</sub> + Q<sub>pu</sub> ..... ( 3 )

式中：

- Q<sub>in</sub> ——输入热量,单位为千焦每千克或千焦每立方米(kJ/kg 或 kJ/m<sup>3</sup>);
Q<sub>net,v,ar</sub> ——收到基低位发热值,单位为千焦每千克(kJ/kg);
Q<sub>ex</sub> ——加热燃料或外来热量,单位为千焦每千克或千焦每立方米(kJ/kg 或 kJ/m<sup>3</sup>);
Q<sub>f</sub> ——燃料物理热,单位为千焦每千克或千焦每立方米(kJ/kg 或 kJ/m<sup>3</sup>);
Q<sub>pu</sub> ——自用蒸汽带入热量,单位为千焦每千克或千焦每立方米(kJ/kg 或 kJ/m<sup>3</sup>)。

注：Q<sub>net,v,ar</sub>是煤的低位发热值,当燃料为其他燃料时应以相应燃料的低位发热值代入;电加热锅炉以输入电功率换算为热量,每千瓦时(kW·h)的发热量折算为 3 600 kJ。

10.1.1.2 饱和蒸汽锅炉热效率计算按式(4)进行：

η<sub>1</sub> = (D<sub>fw</sub> (h<sub>sat,st</sub> - h<sub>fw</sub> - (γω/100)) - G<sub>Hum</sub>γ) / (BQ<sub>in</sub>) ..... ( 4 )

式中：

- η<sub>1</sub> ——正平衡效率,%;
D<sub>fw</sub> ——给水流量,单位为千克每小时(kg/h);
γ ——汽化潜热,单位为千焦每千克(kJ/kg);
ω ——饱和蒸汽湿度,%;
G<sub>Hum</sub> ——测定蒸汽湿度时的锅水取样量,单位为千克每小时(kg/h);

$B$  ——燃料消耗量(入炉燃料的质量或体积流量),单位为千克每小时或立方米每小时(kg/h 或  $\text{m}^3/\text{h}$ )。

10.1.1.3 过热蒸汽锅炉系统热效率计算按式(5)、式(6)或式(7)进行:

a) 测量给水流量时:

$$\eta_1 = \frac{D_{fw}(h_{st,sh,lv} - h_{fw}) - G_{Hum}(h_{st,sh,lv} - h_{sat,st} + \gamma)}{BQ_{in}} \times 100\% \dots\dots\dots (5)$$

b) 测量过热蒸汽流量时:

$$\eta_1 = \frac{(D_{out} + G_s)(h_{st,sh,lv} - h_{fw}) + D_{pu}\left(h_{sat,st} - h_{fw} - \frac{\gamma\omega}{100}\right) + G_{Hum}(h_{sat,st} - \gamma - h_{fw})}{BQ_{in}} \times 100\% \dots\dots\dots (6)$$

式中:

$G_s$  ——测定过热蒸汽含盐量时的蒸汽取样量,单位为千克每小时(kg/h);

$D_{pu}$  ——自用蒸汽量,单位为千克每小时(kg/h)。

当锅炉自用蒸汽为过热蒸汽时:

$$\eta_1 = \frac{(D_{out} + G_s)(h_{st,sh,lv} - h_{fw}) + D_{pu}(h_{pu} - h_{fw}) + G_{Hum}(h_{sat,st} - \gamma - h_{fw})}{BQ_{in}} \times 100\% \dots\dots\dots (7)$$

式中:

$h_{pu}$  ——自用蒸汽焓,单位为千焦每千克(kJ/kg);

$G_{Hum}$  ——测定蒸汽湿度时的锅水取样量,单位为千克每小时(kg/h)。

10.1.1.4 热水锅炉热效率计算按式(8)进行:

$$\eta_1 = \frac{G(h_{ow} - h_{fw,h})}{BQ_{in}} \times 100\% \dots\dots\dots (8)$$

式中:

$G$  ——热水(有机热载体)锅炉工质循环流量,单位为千克每小时(kg/h);

$h_{ow}$  ——热水(有机热载体)锅炉出口工质焓,单位为千焦每千克(kJ/kg);

$h_{fw,h}$  ——热水(有机热载体)锅炉进口工质焓,单位为千焦每千克(kJ/kg)。

10.1.1.5 电加热锅炉热效率计算按式(9)或式(10)进行:

a) 输出饱和蒸汽时:

$$\eta_1 = \frac{D_{fw}\left(h_{sat,st} - h_{fw} - \frac{\gamma\omega}{100}\right) - G_{Hum}\gamma}{3\ 600N} \times 100\% \dots\dots\dots (9)$$

式中:

$N$  ——电加热锅炉每小时用电量,单位为千瓦(kW)。

b) 输出热水时:

$$\eta_1 = \frac{G(h_{ow} - h_{fw,h})}{3\ 600N} \times 100\% \dots\dots\dots (10)$$

## 10.1.2 采用反平衡测量法时锅炉热效率的计算

当采用反平衡测量法测定锅炉热效率时,所采用的燃料消耗量(包括由此计算的灰渣总量),可采用先假定锅炉热效率,通过正平衡有效吸热量的测量计算燃料消耗量,按反平衡迭代计算(前后两次热效

率值之差不大于±1个百分点为合格)的方法确定。锅炉反平衡热效率计算按式(11)进行:

$$\eta_2 = 100 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6 + q_7) \quad \dots\dots\dots(11)$$

式中:

- $\eta_2$ ——反平衡热效率, %;
- $q_2$ ——排烟热损失, %;
- $q_3$ ——气体不完全燃烧热损失, %;
- $q_4$ ——固体不完全燃烧热损失, %;
- $q_5$ ——散热损失, %,按附录 F 等规定的方法进行测量与计算;
- $q_6$ ——灰渣物理热损失, %;
- $q_7$ ——石灰石脱硫热损失, %。

### 10.1.3 其他量的计算

计算锅炉热效率时其他量的计算参照附录 H 中表 H.2 的相关公式进行。

## 10.2 多工质锅炉热效率的计算

### 10.2.1 多工质锅炉单位时间内总有效吸收热量按式(12)计算:

$$Q_1 = \sum_{i=n} Q_{1i} \quad \dots\dots\dots(12)$$

式中:

- $Q_1$  ——每小时总有效吸收热量,单位为千焦每小时(kJ/h);
- $\sum_{i=n} Q_{1i}$  ——每小时各工质有效吸收热量之和,单位为千焦每小时(kJ/h)。

其中:饱和蒸汽有效吸收热量按式(4)中的相关项进行计算;  
 过热蒸汽有效吸收热量按式(5)或式(6)、式(7)中的相关项进行计算;  
 热水有效吸收热量按式(8)中的相关项进行计算。  
 热空气有效吸收热量按式(13)计算:

$$Q_1 = V_{ss} [c_{lv} \cdot (t_{lv} - t_{ca}) - c_{en} \cdot (t_{en} - t_{ca})] \quad \dots\dots\dots(13)$$

式中:

- $V_{ss}$  ——热空气标态流量,单位为立方米每小时( $m^3/h$ );
- $c_{lv}$  ——热空气出口温度下的平均比热,单位为千焦每立方米摄氏度[ $kJ/(m^3 \cdot ^\circ C)$ ];
- $t_{lv}$  ——热空气出口温度,单位为摄氏度( $^\circ C$ );
- $t_{ca}$  ——入炉冷空气温度,单位为摄氏度( $^\circ C$ );
- $c_{en}$  ——热空气进口温度下的平均比热,单位为千焦每立方米摄氏度[ $kJ/(m^3 \cdot ^\circ C)$ ];
- $t_{en}$  ——热空气进口温度,单位为摄氏度( $^\circ C$ )。

### 10.2.2 多工质锅炉热效率(采用正平衡测量法时)计算按式(14)进行:

$$\eta_1 = \frac{Q_1}{BQ_{in}} \quad \dots\dots\dots(14)$$

## 10.3 在锅炉热平衡系统边界内发生烟气冷凝且热量回收利用的锅炉热效率的计算

在锅炉热平衡系统边界内发生烟气冷凝且热量回收利用的锅炉热效率的计算参照附录 A。

## 10.4 添加脱硫剂的循环流化床锅炉热效率的计算

添加脱硫剂的循环流化床锅炉热效率的计算按照附录 I。

## 10.5 热效率计算结果的误差规定

10.5.1 当同时采用正、反平衡测量法测试时,每个试验工况测得的正、反平衡热效率值之差应不大于5个百分点。两个工况测得的正平衡或者反平衡的热效率值之差均应不大于2个百分点。燃油燃气锅炉和电加热锅炉无论采用何种测量法进行试验,测得的热效率值之差均应不大于1个百分点。

10.5.2 取两个试验工况结果的算术平均值作为锅炉热效率最终计算结果。

## 10.6 其他

附录J给出了烟气、灰和空气的平均比定压热容、常用气体的有关量值以及常用法定计量单位及其换算,供计算时参考选用。

## 11 试验报告

11.1 试验报告封面应至少包括下列内容:

- a) 试验锅炉型号;
- b) 锅炉制造单位;
- c) 试验委托单位;
- d) 试验地点;
- e) 试验日期;
- f) 试验单位;
- g) 试验报告编号。

11.2 试验报告正文应至少包括下列内容:

- a) 试验目的和要求;
- b) 试验负责人、参加人员;
- c) 锅炉热平衡系统边界及测点布置图、试验项目及试验用仪器仪表说明;
- d) 试验工况说明和结果分析;
- e) 锅炉设计数据综合表(格式参见附录H中表H.1);
- f) 锅炉试验数据综合表(格式参见附录H中表H.2);
- g) 锅炉试验结果汇总表(格式参见附录H中表H.3)。

11.3 试验报告、试验原始数据应由试验单位存档备查。

附录 A  
(资料性附录)

在锅炉热平衡系统边界内发生烟气冷凝且热量回收利用的锅炉热效率计算

A.1 锅炉出力

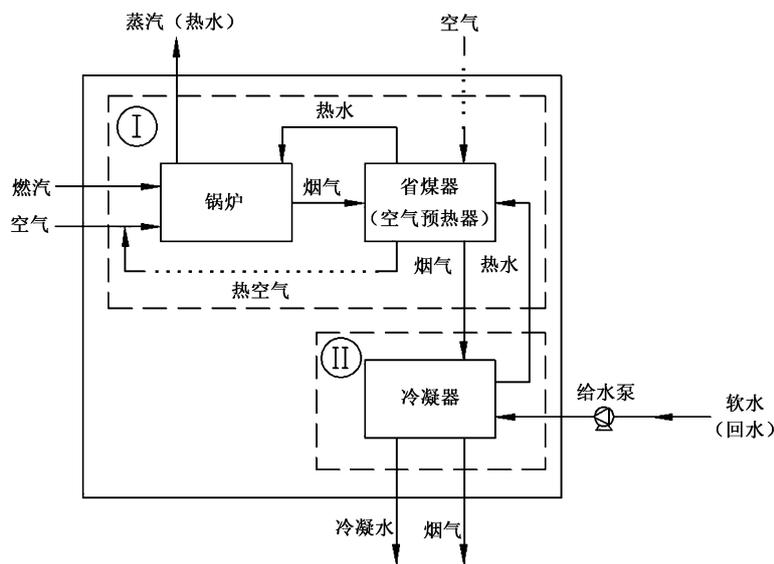
锅炉出力根据锅炉制造单位的设计来确定。对于蒸汽锅炉,如由锅炉本体吸收的有效热量作为锅炉出力,则其折算值扣除自用蒸汽量和锅水采样量即为锅炉出力;如由锅炉本体和冷凝器两个部分有效吸收热量相加,则其出力为锅炉本体部分的折算值加上锅炉冷凝器有效吸热量,并需扣除自用蒸汽量和锅水采样量。对于热水锅炉,其出力为锅炉本体和锅炉冷凝器的有效吸热量之和。

在计算锅炉出力时,应把不同的计量单位统一至相同计量单位。蒸汽锅炉出力单位为 kg/h,热水锅炉热功率单位为 MW。

A.2 锅炉热效率计算

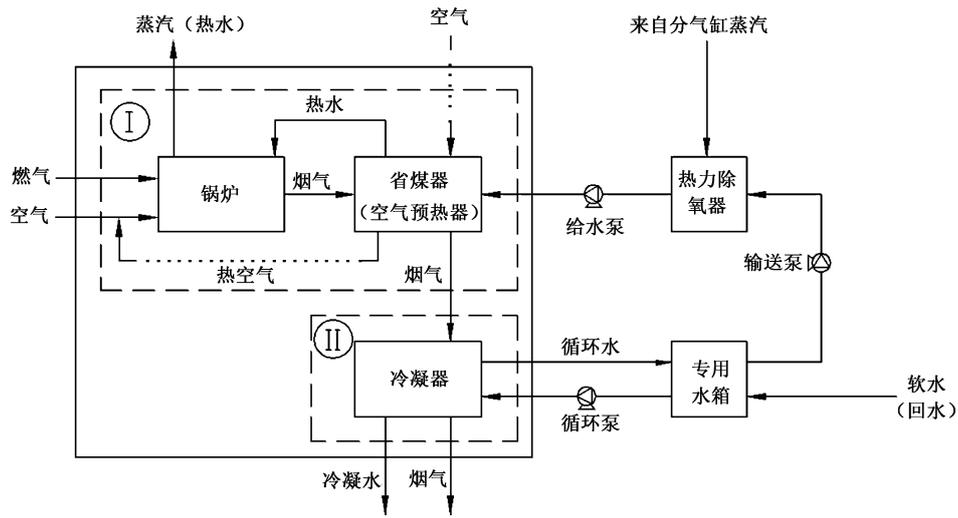
该类锅炉典型构成范围如图 A.1。锅炉热效率由锅炉本体 I 的热效率  $\eta_1$ 、冷凝器 II 的热效率  $\eta_{in}$  相加而得,见式(A.1),为不扣除自用蒸汽和辅助设备所用动力折算热量的毛效率值。

$$\eta = \eta_1 + \eta_{in} \dots\dots\dots (A.1)$$

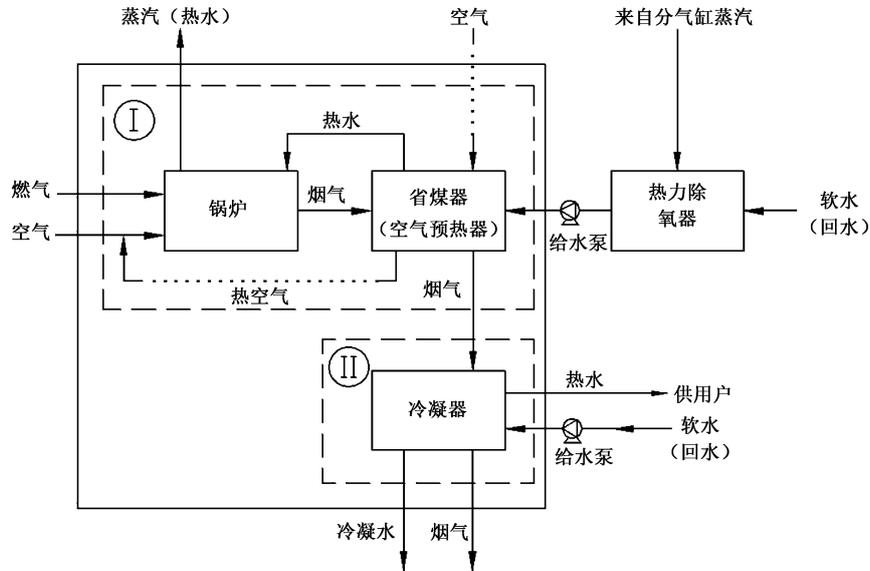


a) 直接给水

图 A.1 锅炉典型构成范围



b) 除氧给水(1)



c) 除氧给水(2)

说明:

- I —— 锅炉本体;
- II —— 锅炉冷凝器。

图 A.1 (续)

### A.2.1 锅炉本体热效率计算

锅炉本体热效率  $\eta_1$  计算按第 10 章相关公式进行。

### A.2.2 锅炉冷凝器热效率 $\eta_{in}$ 计算

锅炉冷凝器有效吸热量按式(A.2)计算:

$$Q_{c.a} = D_{c.fw} (h_{c.iw} - h_{c.ow}) \dots\dots\dots (A.2)$$

式中：

$Q_{c,a}$  ——余热利用装置(冷凝器)的有效吸收热量,单位为千焦每小时(kJ/h)；

$D_{c,fw}$  ——余热利用装置(冷凝器)的给水流量,单位为千克每小时(kg/h)；

$h_{c,iw}$  ——余热利用装置(冷凝器)中的进水焓,单位为千焦每千克(kJ/kg)；

$h_{c,ow}$  ——余热利用装置(冷凝器)中的出水焓,单位为千焦每千克(kJ/kg)。

冷凝器热效率按式(A.3)计算：

$$\eta_{in} = \frac{Q_{c,a}}{BQ_{in}} \dots\dots\dots (A.3)$$

### A.3 试验报告



在锅炉试验报告中应分别表述锅炉本体热效率  $\eta_1$ , 冷凝器热效率  $\eta_{in}$  及在锅炉热平衡系统边界内发生烟气冷凝且热量回收利用的锅炉热效率  $\eta$ 。

**附 录 B**  
(规范性附录)  
锅炉运行试验

## B.1 锅炉运行工况热效率简单测试

### B.1.1 测试范围

锅炉运行工况热效率简单测试是对在用燃煤、燃油和燃气等工业锅炉进行日常运行状态下主要参数的简便快速试验,用于快速判定锅炉实际运行热效率。

### B.1.2 测试条件

锅炉应当具备的测试条件同 7.1.1~7.1.4。

### B.1.3 测试项目

锅炉运行工况热效率简单测试项目如下,测量方法按第 9 章的相关规定:

- a) 排烟温度,  $t_{ds}$ , °C;
- b) 排烟处过量空气系数,  $\alpha_{ds}$ ;
- c) 排烟处 CO 含量, CO, %;
- d) 入炉冷空气温度,  $t_{ca}$ , °C;
- e) 飞灰可燃物含量,  $C_{as}$ , %;
- f) 漏煤可燃物含量,  $C_{cl}$ , %;
- g) 炉渣可燃物含量,  $C_s$ , %;
- h) 燃料工业分析(收到基低位发热值  $Q_{net,v,ar}$ , kJ/kg; 收到基灰分  $A_{ar}$ , %);
- i) 测试开始和结束的时间。

注: 燃油、燃气锅炉不包含 e)~h)。

### B.1.4 测试工况及时间

简单测试的测试工况数为 1 个。测试时间如下:

- a) 层燃锅炉、悬浮燃烧锅炉、流化床锅炉等燃烧固体燃料的锅炉测试时间不少于 1 h;
- b) 燃烧固体燃料的手烧锅炉、下饲式锅炉等的试验时间不少于 1 h,且试验时间内应至少包含一个完整的燃料添加和出渣周期;
- c) 燃烧液体燃料和气体燃料锅炉试验时间不少于 0.5 h。

### B.1.5 测试方法选择

锅炉运行工况热效率简单测试应采用反平衡测量法。

### B.1.6 锅炉热损失计算

#### B.1.6.1 排烟热损失( $q_2$ )

锅炉排烟热损失计算按式(B.1)进行。

$$q_2 = (m + n\alpha_{ds}) \left( \frac{t_{ds} - t_{ca}}{100} \right) \left( 1 - \frac{q_4}{100} \right) \dots\dots\dots (B.1)$$

式中：

$m$ 、 $n$  ——计算系数，根据燃料种类按表 B.1 选取；

$\alpha_{ds}$  ——排烟处过量空气系数；

$t_{ds}$  ——排烟温度，单位为摄氏度(°C)。

表 B.1 不同燃料的计算系数

燃料种类	烟煤	无烟煤、贫煤	油、气
$m$	0.4	0.3	0.5
$n$	3.6	3.5	3.45

B.1.6.2 气体不完全燃烧热损失( $q_3$ )

气体不完全燃烧热损失( $q_3$ )按表 B.2 选取。

表 B.2 气体不完全燃烧热损失( $q_3$ )

项目	单位	数值		
		$CO \leq 0.05 (CO \leq 500)$	$0.05 < CO \leq 0.1 (500 < CO \leq 1\ 000)$	$0.1 < CO (1\ 000 < CO)$
$q_3$	%	0.2	0.5	1

B.1.6.3 固体不完全燃烧热损失( $q_4$ )

固体不完全燃烧热损失( $q_4$ )计算按式(B.2)进行：

$$q_4 = \frac{328.66 \times A_{ar}}{Q_{net,v,ar}} \left( \alpha_{as} \frac{C_{as}}{100 - C_{as}} + \alpha_{cl} \frac{C_{cl}}{100 - C_{cl}} + \alpha_s \frac{C_s}{100 - C_s} \right) \dots\dots\dots (B.2)$$

式中：

$A_{ar}$  ——收到基灰分，%；

$\alpha_{as}$  ——飞灰含灰量占入炉煤总灰量的质量分数，%；

$C_{as}$  ——飞灰可燃物含量，%；

$\alpha_{cl}$  ——漏煤含灰量占入炉煤总灰量的质量分数，%；

$C_{cl}$  ——漏煤可燃物含量，%；

$\alpha_s$  ——炉渣含灰量占入炉煤总灰量的质量分数，%；

$C_s$  ——炉渣可燃物含量，%。

飞灰、漏煤、炉渣含灰量占入炉燃料总灰量的质量分数( $\alpha_{as}$ 、 $\alpha_{cl}$ 、 $\alpha_s$ )按表 B.3 选取。在选取时，应满足  $\alpha_{as} + \alpha_{cl} + \alpha_s = 100$ 。

表 B.3 飞灰、漏煤、炉渣含灰量占入炉燃料总灰量的质量分数(%)

燃烧方式		燃煤时		
		飞灰( $\alpha_{as}$ )	漏煤( $\alpha_{cl}$ )	炉渣(冷灰)( $\alpha_s$ )
层状燃烧	往复炉排锅炉	20~10	5	75~85
	链条炉排锅炉	20~10	5	75~85
	抛煤机炉排锅炉	30~20	5	65~75
流化床燃烧	流化床锅炉	50~40	—	50~60
悬浮燃烧	煤粉锅炉	90~80	—	10~20
	水煤浆锅炉	80~70	—	20~30

#### B.1.6.4 散热损失( $q_5$ )

B.1.6.4.1 锅炉实际运行出力不低于额定出力的 75% 时, 散热损失( $q_5$ ) 按附录 F 中表 F.1 及表 F.2 选取。

B.1.6.4.2 当锅炉实际运行出力低于额定出力的 75% 时, 散热损失( $q_5$ ) 按式(B.3)或式(B.4)修正。

$$\text{蒸汽锅炉: } q_5 = \frac{q_{51t} D_r}{D_{out}} \dots\dots\dots (B.3)$$

$$\text{热水锅炉: } q_5 = \frac{q_{51t} Q_r}{Q_{out}} \dots\dots\dots (B.4)$$

式中:

$q_{51t}$  —— 锅炉散热损失的查表值, 单位为千焦每平方米小时 [ $\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ];

$D_r$  —— 锅炉的额定蒸发量, 单位为千克每小时 ( $\text{kg}/\text{h}$ );

$Q_r$  —— 热水锅炉(有机热载体)的额定输出热量, 单位为千焦每小时或千焦每立方米 ( $\text{kJ}/\text{h}$  或  $\text{kJ}/\text{m}^3$ );

$Q_{out}$  —— 热水锅炉的实际输出热量, 单位为千焦每小时或千焦每立方米 ( $\text{kJ}/\text{h}$  或  $\text{kJ}/\text{m}^3$ )。

B.1.6.4.3 当锅炉实际运行出力低于额定出力 30% 时, 按 30% 出力条件进行修正; 无法计量锅炉出力时, 实际出力按额定出力的 65% 计算。

#### B.1.6.5 灰渣物理热损失( $q_6$ )

灰渣物理热损失( $q_6$ ) 计算(只计算炉渣的物理热损失, 飞灰、漏煤的物理热损失不计)按式(B.5)进行:

$$q_6 = \frac{\alpha_s A_{ar} (ct)_s}{Q_{net,v,ar} (100 - C_s)} \dots\dots\dots (B.5)$$

式中:

$(ct)_s$  —— 炉渣焓, 单位为千焦每千克 ( $\text{kJ}/\text{kg}$ )。

炉渣焓  $(ct)_s$  的选取温度, 层燃锅炉和固态排渣煤粉锅炉炉渣温度按 600 °C 选取, 流化床锅炉炉渣温度按 800 °C 选取。当流化床锅炉有冷渣器, 并投入使用时, 炉渣温度按实际测量值。

#### B.1.6.6 锅炉热效率计算

锅炉运行工况(简单测试)热效率计算按式(11)进行。



## B.2 锅炉运行工况热效率详细测试

**B.2.1** 锅炉运行工况热效率详细测试是为评价工业锅炉在实际运行参数下能效状况或进行节能诊断而进行的热效率试验。

**B.2.2** 锅炉及其系统应具备如下试验条件：

- a) 锅炉能够在设计工况范围内处于安全、热工况稳定的运行状态；
- b) 辅机运行正常，系统不存在跑、冒、滴、漏现象；
- c) 试验期间应使用同一品种和质量的燃料；
- d) 锅炉及系统各测点布置应满足试验大纲的要求。

**B.2.3** 试验要求、试验方法等按第 5 章～第 11 章的规定。其中受试锅炉的试验参数按锅炉实际运行参数而定；锅炉散热损失( $q_5$ )按附录 F 进行，如按附录 F 中表 F.1 进行查表，则需按 B.1.6.4 的要求确定。



**附 录 C**  
**(规范性附录)**  
**煤和煤粉的采样和制备**

## C.1 煤的采样和制备

### C.1.1 煤的采样

工业锅炉的上煤如用小车从煤场拉至磅秤,过磅后再送至炉前煤斗。采样应紧接在过磅前小车上或炉前地面上进行,采样部位一般在小车上距离四角 5 cm 处和中心部位共五点采样;如在地面上,则在煤堆四周高于地面 10 cm 以上处,采样不应少于 5 点。如皮带输送机上采样,应使用铁铲横截煤流,时间间隔要均匀。上述采样方法每点或每次质量不应少于 0.5 kg,取好后的煤样应装入带盖容器中,以防煤中水分蒸发。

### C.1.2 煤样制备

**C.1.2.1** 从燃煤中取出的煤样应经过混合缩分取出化验室用煤样。混合时应把煤样放在方型铁皮盘中或铁板上。由于煤粒大小不均匀,应将大粒煤破碎,通过 13 mm 以下分样筛进行充分搅拌。煤样缩分方法是采用堆锥四分法。操作时,用平板铁锹将煤铲起,不应过多,自上而下撒落在锥体的顶端,使其均匀地落在锥体四周,反复三次,以使煤样的粒度分布均匀。然后用锹从锥体顶端压平,形成一个饼状,再分成四个形状相等的扇型体,将相对的两个扇型体除去。再继续照同样方法进行掺合和缩分,直至所需煤样质量为止。一般缩分到不小于 2 kg,分为两份装入容器内,并严密封口,一份送化验室,一份保存备查。

**C.1.2.2** 对要求更高的煤样制备,应按 GB/T 474 进行。

## C.2 煤粉的采样和缩制

### C.2.1 原煤采样及其制备

对煤粉工业锅炉,进入磨煤机的原煤采样应在给煤机处进行,制备方法同 C.1.2。

### C.2.2 其他煤粉样的采集和缩制

**C.2.2.1** 带直吹制粉系统的煤粉炉,在煤粉出口管道上安装可移动的抽气采样器,按照等速采样法采样。

**C.2.2.2** 带中间储仓制粉系统的煤粉炉,在旋风分离器下粉管上用活动煤粉采样管采样,或在给粉机落粉管上用沉降采样器采样。

**C.2.2.3** 采取的煤粉样应仔细掺混、缩分,最后得到 2 kg 左右的化验室用试样,再将其分装两份并严密封口,一份送化验室,一份保存备查。

附录 D  
(规范性附录)

网格法等面积的划分原则及代表点的确定

D.1 圆形截面网格法等面积的划分原则及代表点的确定

将圆形截面划分为  $n_h$  个等面积的同心圆环,再沿径向(水平或垂直)将每个圆环分成相等面积的两(或四)部分。代表点位于其分界线上,见图 D.1。

代表点距圆形截面中心的位置按式(D.1)求得:

$$r_i = R \sqrt{\frac{2i-1}{2n_h}} \dots\dots\dots (D.1)$$

式中:

- $r_i$  ——代表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代表点序号;
- $n_h$  ——圆形截面所需划分的等面积圆环数。

当圆形截面直径  $d_n$  不超过 400 mm 时,可在一条直径方向上测量;若直径  $d_n$  大于 400 mm 时,则应在相互垂直的两条直径方向上测量。

圆形截面直径  $d_n$  与划分圆环数  $n_h$  的规定见表 D.1。

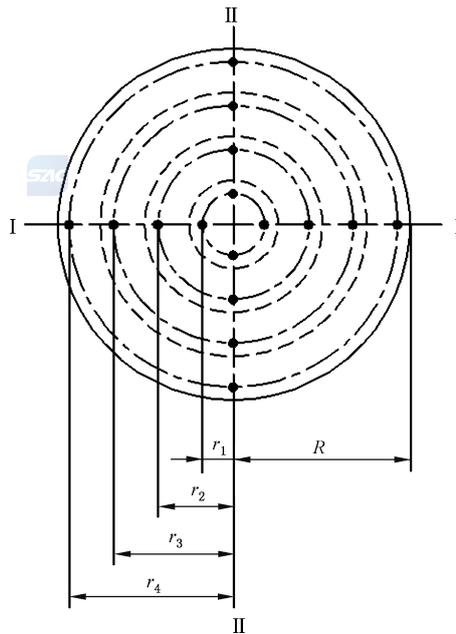


图 D.1 圆形截面代表点分布示意图

表 D.1 圆形截面直径  $d_n$  与划分圆环数  $n_h$  的规定

管道直径 $d_n$ /mm	300	400	600	$d_n > 600$ 时, $d_n$ 每增加 200
等面积圆环数 $n_h$	3	4	5	$n_h$ 增加 1
代表点总数	6	8	20	测点增加 4 <sup>a</sup>
<sup>a</sup> 对于大型圆形管道, 建议一个截面的代表点总数不超过 36 个。				

## D.2 矩形截面网格法等面积的划分原则及代表点的确定

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代表点, 见图 D.2。矩形截面边长  $L_1$  或  $L_2$  与代表点排数  $n_p$  的规定见表 D.2。

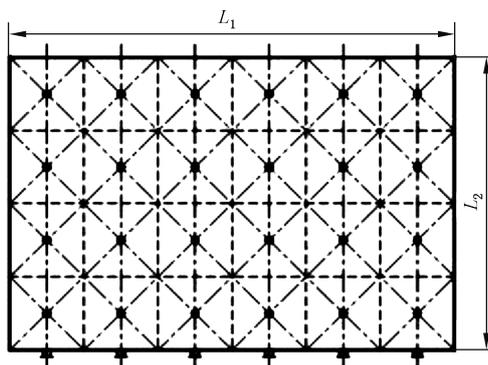


图 D.2 矩型截面代表点分布示意图

表 D.2 矩形截面边长  $L_1$  或  $L_2$  与代表点排数  $n_p$  的规定

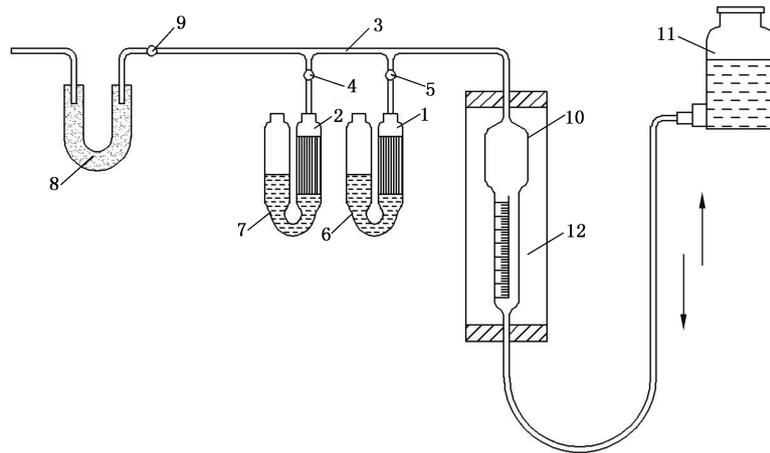
边长 $L_1$ 或 $L_2$ /mm	$\leq 500$	500~1 000	>1 000~1 500	>1 500
代表点排数 $n_p$	3	4	5	$L_1$ 或 $L_2$ 每增长 500, 测点排数 $n_p$ 增加 1 <sup>a</sup>
<sup>a</sup> 对较大的矩形截面, 可适当减少 $n_p$ 值, 建议一个截面的代表点总数不超过 36 个。				

附 录 E  
(规范性附录)  
奥氏分析仪的使用

### E.1 奥氏分析仪原理

奥氏分析仪(如图 E.1)是利用化学吸收法,按容积测定气体成分的仪器。在锅炉热工性能试验中常用来直接测定烟气试样中  $RO_2$  (即:  $CO_2 + SO_2$ ) 及  $O_2$  的容积含量百分率。

通常第一个吸收瓶(即最靠近量气管的)内充氢氧化钾的水溶液,用以吸收  $RO_2$ ; 第二个吸收瓶内充焦性没食子酸的碱溶液,用以吸收  $O_2$ 。



说明:

- 1、2——吸收瓶;
- 3 ——梳形管;
- 4、5——旋塞;
- 6、7——缓冲瓶;
- 8 ——过滤器;
- 9 ——三通旋塞;
- 10 ——量管;
- 11 ——平衡瓶(水准瓶);
- 12 ——水套管。

图 E.1 奥氏分析仪示意图

### E.2 吸收剂的制备



吸收剂可按下列方法配制:

- a) 氢氧化钾溶液[ $RO_2$  (即:  $CO_2 + SO_2$ )]的吸收溶液: 配制时将一份化学纯固体氢氧化钾溶于两份水中, 如将 75 g 氢氧化钾溶于 150 mL 的蒸馏水中。1 mL 溶液约能吸收 40 mL  $RO_2$  (即:  $CO_2 + SO_2$ )。
- b) 焦性没食子酸碱溶液( $O_2$  的吸收溶液): 配制时取 25 g 化学纯焦性没食子酸、75 g 化学纯氢氧化钾一起溶于 200 mL 的蒸馏水中。1 mL 溶液约能吸收 2 mL~2.5 mL  $O_2$ 。

### E.3 奥氏分析仪的使用

E.3.1 为防止分析仪漏气,各旋塞接触面应涂以凡士林油膏。各玻璃部件的连接应用弹性好的厚橡皮管。

E.3.2 插入烟道内的取样管,当烟气温度在  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$  以下时,可以使用不经冷却直径  $8\text{ mL}\sim 12\text{ mL}$  不锈钢或碳钢管。一般烟道截面上,烟气成分的含量通常分布不均匀,在准确度要求较高的试验中应查明烟气浓度场。在一般试验中可沿烟道中心位置进行单线标定取样管插入深度,或在取样管上开一些均匀的孔,如图 E.2。

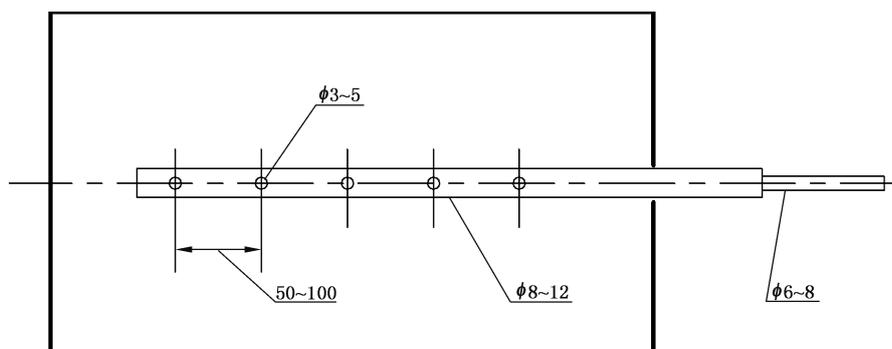


图 E.2 取样管示意图

E.3.3 使用前应检查仪器的严密性,以防泄露。严密性检查方法:首先将吸收瓶的药液液位提升到旋塞 4、5 之下的标线处,关闭旋塞后液位不应下降;其次是关闭三通旋塞(图 E.1 指示 9),尽量提高或放低平衡瓶(图 E.1 指示 11),量管中的液位经  $2\text{ min}\sim 3\text{ min}$  不发生变化。

E.3.4 使用奥氏分析仪分析烟气成分顺序应是先分析  $\text{RO}_2$  (即:  $\text{CO}_2 + \text{SO}_2$ ),再分析  $\text{O}_2$ 。

**附 录 F**  
(规范性附录)  
**散热损失的测量与计算**

**F.1 总则**

锅炉散热损失应按热流计法、查表法和计算法等方法确定。

**F.2 热流计法**

**F.2.1** 按温度水平和结构特点将锅炉热平衡系统边界内的锅炉本体及部件外表面划分成若干近似等温区段,并量出各区段的面积  $F_1、F_2、\dots、F_n$ ,各区段的面积一般不应大于  $2\text{ m}^2$ 。

**F.2.2** 将热流计探头按照该热流计规定的方式或者 GB/T 8174 的相关规定固定于各等温区段的中值点,待热流计显示读数趋于稳定后,连续取 10 个数据,并用算术平均值法求出各个区段的散热强度  $q_{51}、q_{52}、\dots、q_{5n}$ 。

**F.2.3** 用式(F.1)求得整台锅炉的散热损失  $q_5$  :

$$q_5 = \frac{q_{51}F_1 + q_{52}F_2 + \dots + q_{5n}F_n}{BQ_{in}} \dots\dots\dots(F.1)$$

式中:

$q_{51}、q_{52}、\dots、q_{5n}$ ——各区段的散热强度,单位为千焦每平方米小时[kJ/( $\text{m}^2 \cdot \text{h}$ )];

$F_1、F_2、\dots、F_n$ ——各区段的面积,单位为平方米( $\text{m}^2$ )。

**F.3 查表法**

散装锅炉散热损失按表 F.1 取用。锅炉额定蒸发量(或额定热功率)在表中范围但为非表中数据时,用内插法确定锅炉散热损失,若超出表中范围则按 GB/T 10184 中相关方法确定锅炉散热损失。

**表 F.1 锅炉散热损失**

额定蒸发量/(t/h) (或额定热功率/MW)	≤4 (或≤2.8)	6 (或 4.2)	10 (或 7.0)	15 (或 10.5)	20 (或 14)	35 (或 29)	65 (或 46)
散热损失 $q_{5k}/\%$	2.9	2.4	1.7	1.5	1.3	1.1	0.8

**F.4 计算法**

整体出厂和组装锅炉的散热损失可近似地按式(F.2)计算:

$$q_5 = \frac{1\ 670F}{BQ_{in}} \times 100\% \dots\dots\dots(F.2)$$

式中:

$F$ ——锅炉散热总表面积,散热总表面积包括锅炉热平衡系统边界内的锅炉本体、余热回收装置、烟道和水箱等部件,单位为平方米( $\text{m}^2$ )。

## 附录 G (规范性附录)

### 饱和蒸汽湿度和过热蒸汽含盐量测定方法

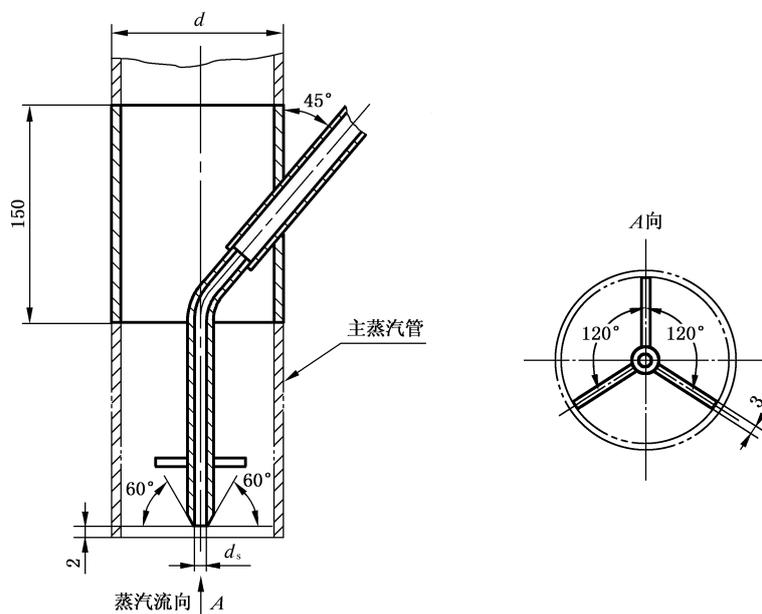
#### G.1 总则

工业锅炉饱和蒸汽湿度可采用硝酸银滴定法(氯根法)、钠度计法或电导率法进行测定;过热蒸汽含盐量可采用钠度计法进行测定。

#### G.2 蒸汽和锅水样的采集

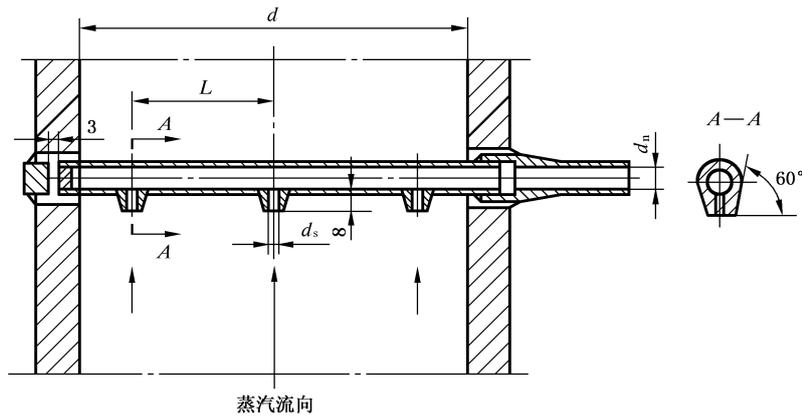
##### G.2.1 采样头

饱和蒸汽的采样头可采用图 G.1 所示结构,如饱和蒸汽引出管径大于 100 mm 以上,也可采用图 G.2 所示结构;过热蒸汽采样头可采用图 G.2 所示结构。



注:  $d_s$  一般为 10 mm。

图 G.1 饱和蒸汽采样头



注：L≈0.433d；d<sub>n</sub>=10 mm~15 mm；d<sub>s</sub>一般为3 mm~4 mm。

图 G.2 过热蒸汽采样头

### G.2.2 等速采样时蒸汽试样流量

为使蒸汽采样管取出的蒸汽含水量与蒸汽引出管中的含水量一致，蒸汽采样管中的速度应和蒸汽引出管中蒸汽速度相等，等速采样时蒸汽试样流量可按式(G.1)或式(G.2)决定；

对单孔采样：

$$G_s = \frac{d_s^2}{d^2} D_{out} \quad \dots\dots\dots (G.1)$$

对多孔采样：

$$G_s = \frac{n_s d_s^2}{d^2} D_{out} \quad \dots\dots\dots (G.2)$$

式中：

G<sub>s</sub> ——测定过热蒸汽含盐量时的蒸汽取样量，单位为千克每小时(kg/h)；

d<sub>s</sub> ——蒸汽试样管孔内径，单位为毫米(mm)；

d ——蒸汽引出管内径，单位为毫米(mm)；

n<sub>s</sub> ——采样孔数量。

蒸汽采样应调节调节阀至计算的试样流量，其偏差值不宜超过±10%。

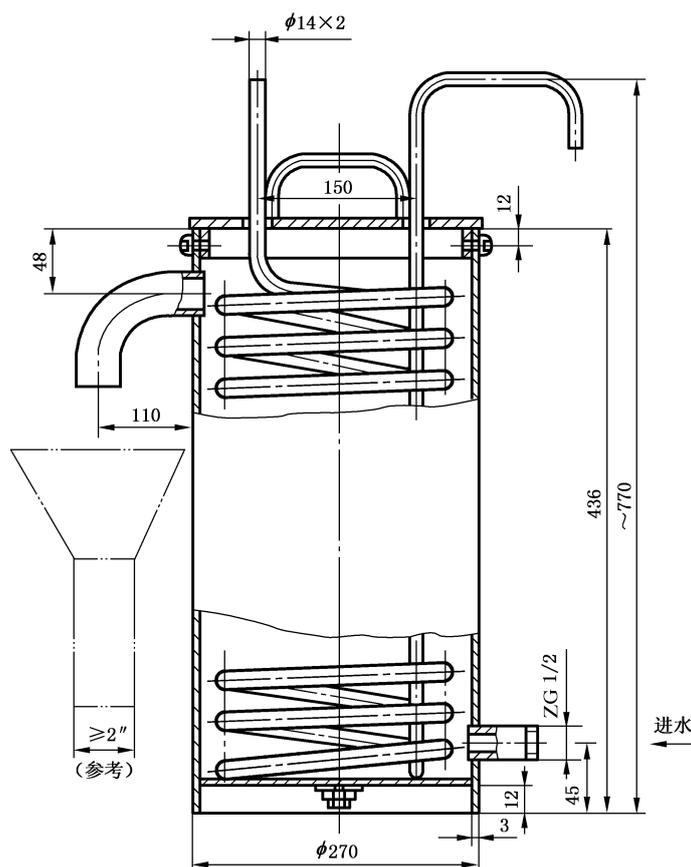
### G.2.3 采样点及采样要求

G.2.3.1 锅水采样点应从具有代表锅水浓度的管道上引出。

G.2.3.2 蒸汽和锅水样品，应通过冷却器冷却到低于30℃~40℃。采样冷却器的结构如图G.3所示。采样管(道)与设备应用不影响分析的耐腐蚀材料制成。蒸汽和锅水样品应保持常流，并加以计量，以确保样品有充分的代表性。

G.2.3.3 盛取蒸汽凝结水样品的容器应是由塑料制成的瓶，盛取锅水样品的容器也可以用硬质玻璃瓶。采样前，应先将采样瓶彻底清洗干净，采样时再用水样冲洗三次以后，按计算的试样流量采样，采样后应迅速盖上瓶塞。

G.2.3.4 在试验期间应定期同时对锅水和蒸汽进行采样和测定。



注：尺寸仅供参考。

图 G.3 采样冷却器

### G.3 饱和蒸汽湿度或过热蒸汽含盐量测定方法

#### G.3.1 硝酸银滴定法(氯根法)

G.3.1.1 用锅炉水质分析仪进行饱和蒸汽湿度的测定。测量方法按该仪器的说明书。

G.3.1.2 用硝酸银滴定法测定饱和蒸汽湿度。用硝酸银滴定法分别测得饱和蒸汽凝结水氯根含量(mg/kg)和锅水氯根含量(mg/kg),按式(G.3)计算饱和蒸汽湿度:

$$\omega = \frac{Cl_{sat, st}^-}{Cl_w^-} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (G.3)$$

式中:

$Cl_{sat, st}^-$  ——饱和蒸汽凝结水氯根含量,单位为毫克每千克(mg/kg);

$Cl_w^-$  ——锅水氯根含量,单位为毫克每千克(mg/kg)。

#### G.3.2 钠度计法( $p_{Na}$ 电极法)

G.3.2.1 用钠离子浓度计测定饱和蒸汽湿度。按该仪器的说明书分别测得饱和蒸汽凝结水钠离子含量(mg/kg)和锅水钠离子含量(mg/kg),按式(G.4)计算饱和蒸汽湿度:

$$\omega = \frac{Na_{sat, st}^+}{Na_w^+} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (G.4)$$

式中：

$\text{Na}_{\text{sat,st}}^+$  ——饱和蒸汽凝结水钠离子含量,单位为毫克每千克(mg/kg)；

$\text{Na}_w^+$  ——锅水钠离子含量,单位为毫克每千克(mg/kg)。

G.3.2.2 用钠离子浓度计测定过热蒸汽含盐量( $\mu\text{g}/\text{kg}$ ),测量方法按该仪器的说明书。

### G.3.3 电导率法

G.3.3.1 用电导率仪进行饱和蒸汽湿度的测定。按该仪器的说明书分别测得锅水的电导率值( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )与饱和蒸汽冷凝水的电导率值( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ),按式(G.5)计算饱和蒸汽湿度：

$$\omega = \frac{G_{\text{sat,st}}}{G_w} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (G.5)$$

式中：

$G_{\text{sat,st}}$  ——饱和蒸汽冷凝水的电导率值,单位为微西门子每厘米( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )；

$G_w$  ——锅水的电导率值,单位为微西门子每厘米( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )。

G.3.3.2 电极常数按电极上校核的系数确定。



## 附录 H

(资料性附录)

## 工业锅炉热工性能试验报告主要内容

## H.1 锅炉设计数据

锅炉设计数据见表 H.1。

表 H.1 锅炉设计数据综合表

序号	名称	符号	单位	设计数据
(一) 锅炉一般特性				
1	锅炉的额定蒸发量	$D_r$	kg/h	
2	额定蒸汽温度	$t_{r,st}$	°C	
3	额定蒸汽压力	$P_r$	MPa	
4	给水温度	$t_{fw}$	°C	
5	热水(有机热载体)锅炉额定输出热量	$Q_r$	kJ/kg 或 kJ/m <sup>3</sup>	
6	热水(有机热载体)锅炉工质循环流量	$G$	kg/h	
7	热水(有机热载体)锅炉进口工质温度	$t_{fw,h}$	°C	
8	热水(有机热载体)锅炉出口工质温度	$t_{ow}$	°C	
9	热水(有机热载体)锅炉出口工质压力	$P_{ow}$	MPa	
10	炉膛容积	$V_{f,b}$	m <sup>3</sup>	
11	炉膛容积热负荷	$q_v$	W/m <sup>3</sup>	
12	炉排面积	$R_g$	m <sup>2</sup>	
13	炉排面积热负荷	$q_R$	W/m <sup>2</sup>	
14	排烟温度	$t_{ds}$	°C	
15	锅炉设计热效率	$\eta_{de}$	%	
16	设计燃料品种	—	—	
17	收到基低位发热值	$Q_{net,v,ar}$	kJ/kg 或 kJ/m <sup>3</sup>	
18	燃料消耗量	$B$	kg/h 或 (m <sup>3</sup> /h)	
19	电加热锅炉电耗量	$N$	(kW·h)/h	
(二) 受热面面积				
20	炉膛辐射受热面(或悬浮段受热面)	$A_{f,b}$	m <sup>2</sup>	
21	对流管束受热面	$A_{con}$	m <sup>2</sup>	
22	过热器受热面	$A_{SH}$	m <sup>2</sup>	
23	省煤器受热面	$A_{ECO}$	m <sup>2</sup>	
24	空气预热器受热面	$A_{AH}$	m <sup>2</sup>	
25	总受热面积	$\Sigma A$	m <sup>2</sup>	

表 H.1 (续)

序号	名称	符号	单位	设计数据
(三) 燃烧设备				
26	炉排传动装置型号规格×数量			
27	炉排传动装置电动机功率	$N_g$	kW	
28	磨煤机型号规格×数量			
29	磨煤机电机功率	$N_m$	kW	
30	给煤机型号规格×数量			
31	给煤机电机功率	$N_{cs}$	kW	
32	破碎机电动机功率	$N_{fr}$	kW	
33	筛分机电机功率	$N_{sc}$	kW	
34	其他电动机功率	$N_{oth}$	kW	
35	煤粉(燃油、燃气)燃烧器型号规格×数量			
36	燃油燃烧器进油温度	$t_{in}$	°C	
37	雾化用蒸汽耗量	$D_{p,st}$	kg/h	
38	雾化用蒸汽压力	$P_{p,st}$	MPa	
39	燃烧器电动机功率	$N_b$	kW	
40	燃油加热器功率	$N_h$	kW	
(四) 除尘器装置				
41	除尘器装置型号规格×数量			
42	脱硫脱硝装置×数量			
(五) 通风装置				
43	自然通风烟囱高度	$H$	m	
44	引风机型号规格×数量			
45	引风机风量	$Q_{in,a}$	m <sup>3</sup> /h	
46	引风机风压	$P_{in,a}$	Pa	
47	引风机电机功率	$N_{in,a}$	kW	
48	鼓(送)风机型号规格×数量			
49	鼓(送)风机风量	$Q_{ba}$	m <sup>3</sup> /h	
50	鼓(送)风机风压	$P_{ba}$	Pa	
51	鼓(送)风机电机功率	$N_{ba}$	kW	
52	其他风机型号规格及功率			
(六) 给水(循环)装置				
53	给水泵(循环泵、热载体泵)型号规格×数量			
54	给水泵(循环泵、热载体泵)流量	$Q_{fw}$	m <sup>3</sup> /h	
55	给水泵(循环泵、热载体泵)扬程	$H_{fw}$	m	
56	给水泵(循环泵、热载体泵)电动机功率	$N_{fw}$	kW	
57	其他给水(循环)装置用设备型号规格及数量			

## H.2 锅炉试验数据

锅炉试验数据见表 H.2。

表 H.2 锅炉试验数据综合表

报告编号：

序号	名称	符号	单位	计算公式或数据来源	试验或计算数据	
					工况 I	工况 II
(一) 燃料特性						
固体燃料、液体燃料						
1	收到基碳	$C_{ar}$	%	化验数据		
2	收到基氢	$H_{ar}$	%	化验数据		
3	收到基氧	$O_{ar}$	%	化验数据		
4	收到基硫	$S_{ar}$	%	化验数据		
5	收到基氮	$N_{ar}$	%	化验数据		
6	收到基灰分	$A_{ar}$	%	化验数据		
7	收到基水分	$M_{ar}$	%	化验数据		
8	干燥无灰基挥发分	$V_{def}$	%	化验数据		
9	收到基低位发热量	$Q_{net,v,ar}$	kJ/kg	化验数据		
10	煤粉细度	$R_{70}$	%	化验数据		
11	进油温度	$t_{lo}$	°C	化验数据		
12	燃油含水率	$M_{ar,lo}$	%	化验数据		
13	燃油密度	$\rho_{lo}$	kg/m <sup>3</sup>	化验数据		
14	燃油收到基低位发热量	$(Q_{net,v,ar})_{lo}$	kJ/kg	化验数据		

表 H.2 (续)

序号	名称	符号	单位	计算公式或数据来源	试验或计算数据	
					工况 I	工况 II
(一) 燃料特性						
气体燃料						
15	收到基甲烷	CH <sub>4</sub>	%	化验数据		
16	收到基乙烷	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	%	化验数据		
17	收到基丙烷	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	%	化验数据		
18	收到基丁烷	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	%	化验数据		
19	收到基戊烷	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	%	化验数据		
20	收到基氢气	H <sub>2</sub>	%	化验数据		
21	收到基氧气	O <sub>2</sub>	%	化验数据		
22	收到基氮气	N <sub>2</sub>	%	化验数据		
23	收到基一氧化碳	CO	%	化验数据		
24	收到基二氧化碳	CO <sub>2</sub>	%	化验数据		
25	收到基硫化氢	H <sub>2</sub> S	%	化验数据		
26	收到基不饱和烃	∑C <sub>m</sub> H <sub>n</sub>	%	化验数据		
27	气体燃料含水量	M <sub>w</sub>	g/m <sup>3</sup>	化验数据(或查表)		
28	气体燃料含灰量	μ <sub>as</sub>	g/m <sup>3</sup>	化验数据		
29	容积成分之和	∑K <sub>i</sub>	%	$\sum K_i = \text{CH}_4 + \text{C}_2\text{H}_6 + \dots + \text{H}_2 + \text{O}_2 + \text{N}_2 + \dots + \sum C_m\text{H}_n + \frac{M_w}{804}$		
30	干气体燃料密度	ρ <sub>d</sub>	kg/m <sup>3</sup>	$\rho_d = 0.0125(\text{CO} + \text{N}_2) + 0.0009\text{H}_2 + \sum(0.54m + 0.045n) + \frac{C_m\text{H}_n}{100} + 0.0152\text{H}_2\text{S} + 0.0197\text{CO}_2 + 0.0143\text{O}_2$		
31	收到基密度	ρ <sub>ar</sub>	kg/m <sup>3</sup>	$\rho_{ar} = \rho_d + \frac{M_w + \mu_{as}}{1000} / \left(1 + \frac{M_w}{104}\right)$		

表 H.2 (续)

序号	名称	符号	单位	计算公式或数据来源	试验或计算数据	
					工况 I	工况 II
(一) 燃料特性						
气体燃料						
32	燃气收到基低位发热量	$(Q_{\text{net,v,ar}})_g$	$\text{kJ/m}^3$	$(Q_{\text{net,v,ar}})_g = \sum_{i=1}^n \frac{K_i}{100} (Q_{\text{net,v,ar}}^d)_i / \left(1 + \frac{M_w}{104}\right)$ , 或化验数据		
(二) 锅炉正平衡效率计算						
33	给水流量	$D_{fw}$	$\text{kg/h}$	化验数据		
34	过热蒸汽流量	$D_s$	$\text{kg/h}$	化验数据		
35	自用蒸汽量	$D_{pu}$	$\text{kg/h}$	化验数据		
36	测量蒸汽湿度时的锅水取样品量	$G_{Hum}$	$\text{kg/h}$	化验数据		
37	测量蒸汽湿度时的蒸汽取样品量	$G_s$	$\text{kg/h}$	化验数据		
38	输出蒸汽量	$D_{out}$	$\text{kg/h}$	$D_{out} = D_{fw} - G_{Hum}$ 或 $D_s$		
39	蒸汽压力(表压)	$p$	MPa	试验数据		
40	过热蒸汽温度	$t_{st,sh,lv}$	$^{\circ}\text{C}$	试验数据		
41	过热蒸汽焓	$h_{st,sh,lv}$	$\text{kJ/kg}$	查表		
42	饱和蒸汽焓	$h_{sat,st}$	$\text{kJ/kg}$	查表		
43	自用蒸汽焓	$h_{pu}$	$\text{kJ/kg}$	查表		
44	饱和蒸汽湿度	$\omega$	%	试验数据		
45	过热蒸汽含盐量	$S_{st,RHLv}$	$\mu\text{g/kg}$	试验数据		
46	汽化潜热	$\gamma$	$\text{kJ/kg}$	查表		
47	给水温度	$t_{fw}$	$^{\circ}\text{C}$	试验数据		
48	给水压力	$P_{fw}$	MPa	试验数据		
49	给水焓	$h_{fw}$	$\text{kJ/kg}$	查表		



表 H.2 (续)

序号	名称	符号	单位	计算公式或数据来源	试验或计算数据	
					工况 I	工况 II
(二) 锅炉正平衡效率计算						
50	热水(有机热载体) 锅炉工质循环流量	$G$	kg/h	试验数据		
51	热水(有机热载体) 锅炉进口工质温度	$t_{fw,h}$	°C	试验数据		
52	热水(有机热载体) 锅炉出口工质温度	$t_{ow}$	°C	试验数据		
53	热水(有机热载体) 锅炉进口工质压力	$P_{fw,h}$	MPa	试验数据		
54	热水(有机热载体) 锅炉出口工质压力	$P_{ow}$	MPa	试验数据		
55	热水(有机热载体) 锅炉进口工质焓	$h_{fw,h}$	kJ/kg	查表		
56	热水(有机热载体) 锅炉出口工质焓	$h_{ow}$	kJ/kg	查表		
57	热水(有机热载体) 锅炉输出热量	$Q_{act}$	MW	$Q_{act} = \frac{1}{36} G (h_{ow} - h_{fw,h}) \times 10^{-5}$		
58	燃料消耗量	$B$	kg/h; m <sup>3</sup> /h	试验数据		
59	燃料物理热	$Q_f$	kJ/kg; kJ/m <sup>3</sup>	试验数据		
60	加热燃料或外来热量	$Q_{ex}$	kJ/kg; kJ/m <sup>3</sup>	试验数据		
61	自用蒸汽带入热量	$Q_{pu}$	kJ/kg	计算数据		
62	输入热量	$Q_{in}$	kJ/kg	按式(3)		

表 H.2 (续)

序号	名称	符号	单位	计算公式或数据来源	试验或计算数据	
					工况 I	工况 II
(二) 锅炉正平衡效率计算						
63	正平衡效率	$\eta_1$	%	对于饱和蒸汽锅炉,按式(4)		
				对于过热蒸汽锅炉,按式(5)或式(6)、式(7)		
				对于热水(热载体)锅炉,按式(8)		
				对于电加热锅炉:输出为饱和蒸汽时按式(9);输出为热水时按式(10)		
(三) 锅炉反平衡效率计算						
64	炉渣淋水后含水量	$M_s$	%	化验数据		
65	湿炉渣质量	$G_{sl}^{hum}$	kg/h	试验数据		
66	炉渣质量	$G_{sl}$	kg/h	$G_{sl} = G_{sl}^{hum} \left(1 - \frac{M_s}{100}\right)$		
67	漏煤质量	$G_d$	kg/h	试验数据		
68	烟道灰质量	$G_{pd}$	kg/h	试验数据		
69	溢流灰质量	$G_{on}$	kg/h	试验数据		
70	冷灰质量	$G_{en}$	kg/h	试验数据		
71	循环灰质量	$G_{rec}$	kg/h	试验数据		
72	炉渣可燃物含量	$C_s$	%	试验数据		
73	漏煤可燃物含量	$C_{cl}$	%	试验数据		
74	烟道灰可燃物含量	$C_{pd}$	%	试验数据		
75	溢流灰可燃物含量	$C_{on}$	%	试验数据		
76	冷灰可燃物含量	$C_{en}$	%	试验数据		
77	循环灰可燃物含量	$C_{rec}$	kg/h	试验数据		
78	飞灰可燃物含量	$C_{as}$	%	试验数据		

表 H.2 (续)

序号	名称	符号	单位	计算公式或数据来源	试验或计算数据	
					工况 I	工况 II
(三) 锅炉反平衡效率计算						
79	炉渣含灰量占入炉煤总灰量的质量分数	$\alpha_s$	%	$\alpha_s = \frac{G_{sl}(100 - C_s)}{BA_{ar}} \times 100$		
80	漏煤含灰量占入炉煤总灰量的质量分数	$\alpha_{cl}$	%	$\alpha_{cl} = \frac{G_{cl}(100 - C_{cl})}{BA_{ar}} \times 100$		
81	烟道灰含灰量占入炉煤总灰量的质量分数	$\alpha_{pd}$	%	$\alpha_{pd} = \frac{G_{pd}(100 - C_{pd})}{BA_{ar}} \times 100$		
82	溢流灰含灰量占入炉煤总灰量的质量分数	$\alpha_{on}$	%	$\alpha_{on} = \frac{G_{on}(100 - C_{on})}{BA_{ar}} \times 100$		
83	冷灰含灰量占入炉煤总灰量的质量分数	$\alpha_{cn}$	%	$\alpha_{cn} = \frac{G_{cn}(100 - C_{cn})}{BA_{ar}} \times 100$		
84	循环灰含灰量占入炉煤总灰量的质量分数	$\alpha_{rec}$	%	$\alpha_{rec} = \frac{G_{rec}(100 - C_{rec})}{BA_{ar}} \times 100$		
85	飞灰含灰量占入炉煤总灰量的质量分数	$\alpha_{ns}$	%	$\alpha_{ns} = 100 - (\alpha_s + \alpha_{cl} + \alpha_{pd} + \alpha_{on} + \alpha_{rec} + \alpha_{cn})$		
86	固体不完全燃烧热损失	$q_4$	%	$q_4 = \left( \alpha_s \frac{C_s}{100 - C_s} + \alpha_{cl} \frac{C_{cl}}{100 - C_{cl}} + \alpha_{pd} \frac{C_{pd}}{100 - C_{pd}} + \alpha_{on} \frac{C_{on}}{100 - C_{on}} + \alpha_{cn} \frac{C_{cn}}{100 - C_{cn}} + \alpha_{rec} \frac{C_{rec}}{100 - C_{rec}} + \alpha_{ns} \frac{C_{ns}}{100 - C_{ns}} \right) \times \frac{328.664A_{ar}}{Q_{in}}$		
87	排烟处 $RO_2$ (即: $CO_2 + SO_2$ )	$RO'_2$	%	试验数据		
88	排烟处 $O_2$	$O'_2$	%	试验数据		
89	排烟处 CO	$CO'$	%	试验数据		
90	排烟处 $H_2$	$H'_2$	%	试验数据		
91	排烟处 $H_2S$	$H'_2S$	%	试验数据		

表 H.2 (续)

序号	名称	符号	单位	计算公式或数据来源	试验或计算数据	
					工况 I	工况 II
(三) 锅炉反平衡效率计算						
92	排烟处 $C_m H'_n$	$C_m H'_n$	%	试验数据		
93	燃料特征系数	$\beta$	—	<p>i) 对于煤和油: <math>\beta = 2.35 \frac{H_{ar} - 0.126O_{ar} + 0.038N_{ar}}{C_{ar} + 0.375S_{ar}}</math></p> <p>ii) 对于气体燃料:</p> $\beta = \left[ \frac{0.209N_2 + 0.395CO + 0.396H_2 + 1.584CH_4}{CO_2 + 0.994CO + 0.995CH_4 + 2.001\sum C_m H_n} + \frac{2.389\sum C_m H_n - 0.791O_2}{CO_2 + 0.994CO + 0.995CH_4 + 2.001\sum C_m H_n} \right] - 0.791$		
94	理论最大 $RO_2$ (即: $CO_2 + SO_2$ ) 百分率	$RO_2^{\max}$	%	$RO_2^{\max} \frac{21}{1 + \beta}$		
95	修正系数	$K_{qt}$	%	$K_{qt} = \frac{100 - q_4}{100}$		
96	排烟处过量空气系数	$\alpha_{ds}$	—	i) 对于煤和油: $\alpha_{ds} = \frac{21}{21 - 79 \frac{O'_2 - (0.5CO' + 0.5H'_2 + 2C_m H'_n)}{100 - (RO'_2 + O'_2 + CO' + H'_2 + C_m H'_n)}}$		
				ii) 对于气体燃料: $\alpha_{ds} = \frac{21}{21 - 79 \frac{O'_2 - (0.5CO' + 0.5H'_2 + 2CH'_4)}{N'_2 (RO'_2 + CO' + CH'_4) - CO_2 + CO + \sum m C_m H_n + H_2 S}}$		
97	理论空气量	$V^0$	$m^3/kg; m^3/m^3$	i) 对于煤和油: $V^0 = 0.0889(C_{ar} + 0.375S_{ar}) + 0.265H_{ar} - 0.0333O_{ar}$		
				ii) 对于气体燃料: $V^0 = 0.0476[0.5CO + 0.5H_2 + 1.5H_2S + 2CH_4 + \sum(m + \frac{n}{4})C_m H_n - O_2]$		

表 H.2 (续)

序号	名称	符号	单位	计算公式或数据来源	试验或计算数据	
					工况 I	工况 II
(三) 锅炉反平衡效率计算						
98	RO <sub>2</sub> (即:CO <sub>2</sub> +SO <sub>2</sub> )容积	V <sub>RO<sub>2</sub></sub>	m <sup>3</sup> /kg; m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	i) 对于煤和油: $V_{RO_2} = 1.866 \frac{C_{ar} + 0.375S_{ar}}{100}$ ii) 对于气体燃料: $V_{RO_2} = 0.01(CO_2 + CO + H_2S + \sum mC_m H_n)$		
99	理论氮气体积	V <sub>N<sub>2</sub></sub> <sup>0</sup>	m <sup>3</sup> /kg; m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	i) 对于煤和油: $V_{N_2}^0 = 0.79V^0 + \frac{0.8N_{ar}}{100}$ ii) 对于气体燃料: $V_{N_2}^0 = 0.79V^0 + \frac{0.8N_2}{100}$		
100	雾化用蒸汽耗汽率	D <sub>awo</sub>	kg/kg	试验数据或 D <sub>pw</sub> /B		
101	理论水蒸气体积	V <sub>H<sub>2</sub>O</sub> <sup>0</sup>	m <sup>3</sup> /kg	i) 对于煤和油: $V_{H_2O}^0 = 0.1111H_{ar} + 0.0124M_{ar} + 0.0161V^0 + 1.24D_{awo}$		
102			m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	ii) 对于气体燃料: $V_{H_2O}^0 = 0.01(H_2S + H_2 + \sum \frac{n}{2} C_m H_n + 0.124M_w) + 0.161V^0$		
103	排烟处水蒸气体积	V <sub>H<sub>2</sub>O</sub>	m <sup>3</sup> /kg; m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	$V_{H_2O} = V_{H_2O}^0 + 0.0161(\alpha_{ds} - 1)V^0$		
104	排烟处干烟气体积	V <sub>d,fg</sub>	m <sup>3</sup> /kg; m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	$V_{d,fg} = V_{RO_2} + V_{N_2}^0 + V_{N_2} + (\alpha_{ds} - 1)V^0$		
105	排烟处烟气体积	V <sub>ds</sub>	m <sup>3</sup> /kg; m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	$V_{ds} = V_{d,fg} + V_{H_2O}$		
106	气体不完全燃烧热损失	q <sub>3</sub>	%	$q_3 = \frac{V_{d,fg}K_{q3}}{Q_{in}} \times (126.36CO' + 107.98H'_2 + 590.79C_m H'_n) \times 100$		
107	入炉冷空气温度	t <sub>ca</sub>	°C	试验数据		
108	入炉热空气温度	t <sub>ha</sub>	°C	试验数据		
109	排烟温度	t <sub>ds</sub>	°C	试验数据		

表 H.2 (续)

序号	名称	符号	单位	计算公式或数据来源	试验或计算数据	
					工况 I	工况 II
(三) 锅炉反平衡效率计算						
110	排烟处干烟气 平均比定压热容	$c_{d,fg}$	$\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$	$c_{d,fg} = \frac{RO'_{2,C_{RO_2}} + N'_{2,C_{N_2}} + O'_{2,C_{O_2}} + CO'_{C_{CO}} + H'_{2,C_{H_2}} + \dots}{100}$ ( $c_{RO_2}$ 、 $c_{N_2}$ 、 $c_{O_2}$ 、 $\dots$ 查表)		
111	排烟处烟气的焓	$h_{ds}$	$\text{kJ}/\text{kg}; \text{kJ}/\text{m}^3$	$h_{ds} = V_{d,fg} c_{d,fg} t_{ds} + V_{H_2O} c_{H_2O} t_{ds}$ ( $c_{H_2O}$ 查表)		
112	入炉冷空气焓	$h_{ca}$	$\text{kJ}/\text{kg}$	$h_{ca} = \alpha_{ds} V^0(ct)_{ca}$ [( $ct$ ) <sub>ca</sub> 查表]		
113	排烟热损失	$q_2$	%	$q_2 = \frac{K_{q2}}{Q_{in}} (h_{ds} - h_{ca}) \times 100$		
114	散热损失	$q_5$	%	附录 F		
115	燃烧室排出炉渣温度	$t_s$	$^\circ\text{C}$	试验数据或经验数据		
116	漏煤温度	$t_{cl}$	$^\circ\text{C}$	试验数据或经验数据		
117	溢流灰温度	$t_{on}$	$^\circ\text{C}$	试验数据		
118	烟道灰温度	$t_{pd}$	$^\circ\text{C}$	试验数据		
119	循环灰温度	$t_{rec}$	$^\circ\text{C}$	试验数据		
120	飞灰温度	$t_{as}$	$^\circ\text{C}$	同排烟温度		
121	冷灰温度	$t_{cs}$	$^\circ\text{C}$	试验数据		
122	炉渣焓	( $ct$ ) <sub>s</sub>	$\text{kJ}/\text{kg}$	查表计算		
123	漏煤焓	( $ct$ ) <sub>cl</sub>	$\text{kJ}/\text{kg}$	查表计算		
124	烟道灰焓	( $ct$ ) <sub>pd</sub>	$\text{kJ}/\text{kg}$	查表计算		
125	循环灰焓	( $ct$ ) <sub>rec</sub>	$\text{kJ}/\text{kg}$	查表计算		
126	冷灰焓	( $ct$ ) <sub>ca</sub>	$\text{kJ}/\text{kg}$	查表计算		

表 H.2 (续)

序号	名称	符号	单位	计算公式或数据来源	试验或计算数据	
					工况 I	工况 II
(三) 锅炉反平衡效率计算						
127	溢流灰焓	$(ct)_{on}$	kJ/kg	查表计算		
128	飞灰焓	$(ct)_{fs}$	kJ/kg	查表计算		
129	灰渣物理热损失	$q_6$	%	$q_6 = \frac{A_{ar}}{Q_{in}} \left[ \frac{\alpha_s(ct)_s}{100 - C_s} + \frac{\alpha_{cl}(ct)_{cl}}{100 - C_{cl}} + \frac{\alpha_{pd}(ct)_{pd}}{100 - C_{pd}} + \frac{\alpha_{on}(ct)_{on}}{100 - C_{on}} + \frac{\alpha_{cn}(ct)_{cn}}{100 - C_{cn}} \right] + \frac{\alpha_{rec}(ct)_{rec}}{100 - C_{rec}} + \frac{\alpha_{as}(ct)_{as}}{100 - C_{as}}$		
130	石灰石脱硫热损失	$q_7$	%	$q_7 = \frac{S_{ar}(57.19\gamma_{Ca/S}\beta_{lj} - 151.95\eta_{SO_2})}{Q_{in}}$		
131	热损失之和	$\sum q$	%	$\sum q = q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6 + q_7$		
132	反平衡热效率	$\eta_2$	%	按式(11)		
(四) 锅炉平均热效率计算						
133	锅炉平均热效率	$\eta_{1,2}$	%	$\eta_{1,2} = (\eta_1 + \eta_2) / 2$		
(五) 锅炉净效率计算						
134	制粉系统每小时(包括破碎、筛分、磨煤、给煤等)用电量	$N_m$	kW	试验数据		
135	燃烧设备用电量(包括炉排变速电机、燃油气燃烧器电机、燃油加热器等)	$N_{com}$	kW	试验数据		
136	鼓(送)风机电机功率	$N_{sc}$	kW	试验数据		
137	引风机电机功率	$N_{m,n}$	kW	试验数据		

表 H.2 (续)

序号	名称	符号	单位	计算公式或数据来源	试验或计算数据	
					工况 I	工况 II
(五) 锅炉净效率计算						
138	给水泵电动机功率	$N_{fw}$	kW	试验数据		
139	每小时总用电量	$\sum N$	kW	$\sum N = N_m + N_{com} + N_{sc} + N_{in,s} + N_{fw}$		
140	相当于每小时每吨蒸汽的用电量	$E_b$	kW	$E_b = \frac{\sum N}{D_{out}}$		
141	锅炉净效率	$\eta_{net}$	%	$\eta_{net} = \eta_{1,2} - \frac{\sum N \times 3600 + D_{pd}(h_{pd} - h_{fw})}{BQ_{in}}$		
<p>当试验锅炉燃用其他燃料或为其他炉型或试验用于其他目的、试验过程中脱硫脱硝等时,本表的内容可作相应调整。</p> <p><b>注 1:</b> 本表中内容适用于以煤、油、气为燃料或以电能为输入能量的常规锅炉定型试验,也未考虑脱硫脱硝的影响;当试验锅炉燃用其他燃料或为其他炉型或试验用于其他目的、试验过程中脱硫脱硝等时,本表的内容可作相应调整。</p> <p><b>注 2:</b> 本表中的表述为一种工质的计算例表,如有两种或两种以上工质时,第二种或两种以上工质吸收的有效热量计入在总的有效热量 <math>\sum_{i=1}^n Q_{t_i}</math> 内。</p> <p><b>注 3:</b> 本表中“(五)锅炉净效率计算”这部分为可选项,在需要时予以保留。</p>						

H.3 试验结果

试验结果汇总见表 H.3。

表 H.3 试验结果汇总表

报告编号：

试验工况	锅炉出力/ (t/h 或 MW)	正平衡 热效率值 $\eta_1/\%$	反平衡 热效率值 $\eta_2/\%$	热效率平均值 $\eta_{1,2}/\%$	排烟温度 $t_{ds}/^\circ\text{C}$	排烟处过量 空气系数 $\alpha_{ds}$	炉渣可燃物含量 $C_s/\%$
1							
2							
3 <sup>a</sup>							
锅炉平均出力 /(t/h 或 MW)			工质进口温度/ $^\circ\text{C}$			锅炉平均 热效率 <sup>b</sup> / $\%$	
			工质出口温度/ $^\circ\text{C}$				
蒸汽压力/MPa			饱和蒸汽湿度/ $\%$			过热蒸汽含 盐量/(mg/kg)	
<sup>a</sup> 对于流化床燃烧锅炉、水煤浆燃烧锅炉和煤粉燃烧锅炉进行 70% 以下低负荷试验时的测试结果。 <sup>b</sup> 在锅炉热平衡系统边界内发生烟气冷凝且热量回收利用的锅炉热效率应同时列出锅炉本体热效率和冷凝器热效率。							



## 附 录 I

(规范性附录)

## 添加脱硫剂的循环流化床锅炉热效率的计算

## I.1 添加脱硫剂入炉灰分计算

## I.1.1 钙硫摩尔比计算

钙硫摩尔比按式(I.1)计算:

$$r_{\text{Ca/S}} = \frac{32.066}{100.086} \frac{\text{CaCO}_{3,\text{ar}}}{S_{\text{ar}}} \frac{B_{\text{shs}}}{B} \dots\dots\dots (I.1)$$

式中:

 $r_{\text{Ca/S}}$  ——钙硫摩尔比; $\text{CaCO}_{3,\text{ar}}$  ——脱硫剂中碳酸钙的质量分数, %; $B_{\text{shs}}$  ——脱硫剂质量流量,单位为千克每小时(kg/h); $S_{\text{ar}}$  ——收到基硫, %。

## I.1.2 脱硫效率

脱硫效率按式(I.2)计算:

$$\eta_{\text{SO}_2} = \frac{V_{\text{SO}_2}^0 - V_{\text{SO}_2}}{V_{\text{SO}_2}^0} \times 100 \dots\dots\dots (I.2)$$

式中:

 $\eta_{\text{SO}_2}$  ——脱硫效率, %; $V_{\text{SO}_2}^0$  ——锅炉排烟中二氧化硫气体理论计算排放值,单位为毫克每立方米( $\text{mg}/\text{m}^3$ ),计算见式(I.3); $V_{\text{SO}_2}$  ——锅炉排烟中二氧化硫气体实测值折算为  $\alpha_{\text{ds}} = 1.75$  时干烟气中的质量含量,单位为毫克每立方米( $\text{mg}/\text{m}^3$ )。

$$V_{\text{SO}_2}^0 = \frac{64}{2.066} \frac{S_{\text{ar}}}{V_{\text{ds},1.75}} \times 10^4 \dots\dots\dots (I.3)$$

式中:

 $V_{\text{ds},1.75}$  ——根据 GB 13271 的规定,  $V_{\text{ds}}$  为过量空气系数在 1.75 时的干烟气体积,单位为立方米每千克( $\text{m}^3/\text{kg}$ )。

## I.1.3 添加脱硫剂后入炉灰分计算

添加脱硫剂后,入炉燃料灰分包括:入炉燃料带入的灰分、脱硫生成的硫酸钙、未参加脱硫反应的氧化钙、未发生分解反应的碳酸钙、脱硫剂杂质。相应每千克入炉燃料灰分按式(I.4)计算:

$$A_{\text{js}} = A_{\text{ar}} + A_{\text{CaSO}_4} + A_{\text{CaO}} + A_{\text{wfj}} + A_{\text{zz}} \dots\dots\dots (I.4)$$

式中:

 $A_{\text{js}}$  ——添加脱硫剂后,相应每千克入炉燃料灰分的质量,单位为千克每千克( $\text{kg}/\text{kg}$ ); $A_{\text{CaSO}_4}$  ——相应每千克入炉燃料,脱硫后生成的硫酸钙的质量,单位为千克每千克( $\text{kg}/\text{kg}$ ); $A_{\text{CaO}}$  ——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,单位为千克每千克( $\text{kg}/\text{kg}$ );

$A_{w_{\text{fj}}}$  ——相应每千克入炉燃料,脱硫剂未分解的碳酸钙的质量,单位为千克每千克(kg/kg);

$A_{\text{zz}}$  ——相应每千克入炉燃料,脱硫剂灰分的质量,单位为千克每千克(kg/kg)。

相应每千克入炉燃料,脱硫后生成的硫酸钙的质量按式(I.5)计算:

$$A_{\text{CaSO}_4} = \frac{136.140}{32.066} \frac{\eta_{\text{SO}_4}}{100} S_{\text{ar}} \quad \dots\dots\dots(\text{I.5})$$

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按式(I.6)计算:

$$A_{\text{CaO}} = \frac{56.077}{32.066} \left( r_{\text{Ca/S}} \frac{\beta_{\text{fj}}}{100} - \frac{\eta_{\text{il}}}{100} \right) S_{\text{ar}} \quad \dots\dots\dots(\text{I.6})$$

式中:

$\beta_{\text{fj}}$  ——脱硫剂中分解的碳酸钙占碳酸钙总体的质量分数,%,取值98。

相应每千克入炉燃料,脱硫剂未分解的碳酸钙的质量按式(I.7)计算:

$$A_{w_{\text{fj}}} = \frac{100.086}{32.066} S_{\text{ar}} r_{\text{Ca/S}} \left( 1 - \frac{\beta_{\text{fj}}}{100} \right) \quad \dots\dots\dots(\text{I.7})$$

式中:

$A_{w_{\text{fj}}}$  ——脱硫剂为分解的碳酸钙的质量,单位为千克每千克(kg/kg)。

相应每千克入炉燃料,脱硫剂灰分的质量按式(I.8)计算:

$$A_{\text{zz}} = \frac{100.086}{32.066} \frac{S_{\text{ar}}}{\text{CaCO}_{3,\text{ar}}} r_{\text{Ca/S}} m_{\text{zz,as}} \quad \dots\dots\dots(\text{I.8})$$

式中:

$m_{\text{zz,as}}$  ——脱硫剂中收到基杂质(包括碳酸镁)的质量分数,%。

## I.2 添加脱硫剂后修正的理论干空气量和理论干烟气量计算

由于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烬碳,在添加脱硫剂后实际燃烧的碳按式(I.9)计算:

$$C_{\text{ar}}^{\text{r}} = C_{\text{ar}} - \frac{A_{\text{js}} \bar{C}}{100} \quad \dots\dots\dots(\text{I.9})$$

式中:

$C_{\text{ar}}^{\text{r}}$  ——燃料收到基实际烧掉的碳质量分数,%;

$C_{\text{ar}}$  ——收到基碳,%;

$\bar{C}$  ——灰渣中平均含碳量与燃料计算灰量之比,%,按式(I.10)计算。

$$\bar{C} = \frac{\alpha_{\text{ca}} C_{\text{ca}}}{100 - C_{\text{ca}}} + \frac{\alpha_{\text{as}} C_{\text{as}}}{100 - C_{\text{as}}} + \frac{\alpha_{\text{rec}} C_{\text{rec}}}{100 - C_{\text{rec}}} + \frac{\alpha_{\text{pd}} C_{\text{pd}}}{100 - C_{\text{pd}}} \quad \dots\dots\dots(\text{I.10})$$

式中:

$\alpha_{\text{ca}}$  ——冷灰(炉底渣)含灰量占入炉总煤灰量的质量分数,%;

$\alpha_{\text{rec}}$  ——循环灰含灰量占入炉总煤灰量的质量分数,%;

$\alpha_{\text{pd}}$  ——烟道灰(沉降灰)含灰量占入炉总煤灰量的质量分数,%;

$C_{\text{ca}}$  ——冷灰可燃物含量,%;

$C_{\text{rec}}$  ——循环灰可燃物含量,%;

$C_{\text{pd}}$  ——烟道灰(沉降灰)可燃物含量,%。

冷灰份额( $\alpha_{\text{ca}}$ )按式(I.11)计算:

$$\alpha_{\text{ca}} = \frac{G_{\text{ca}}}{G_{\text{to,ash}}} \left( 1 - \frac{C_{\text{ca}}}{100} \right) \times 100 \quad \dots\dots\dots(\text{I.11})$$

式中：

$G_{ca}$  ——冷灰(炉底渣)质量,单位为千克每小时(kg/h)；

$G_{to,ash}$  ——锅炉总排灰质量,单位为千克每小时(kg/h)。

循环灰份额( $\alpha_{rec}$ )按式(I.12)计算：

$$\alpha_{rec} = \frac{G_{rec}}{G_{to,ash}} \left( 1 - \frac{C_{rec}}{100} \right) \times 100 \quad \dots\dots\dots (I.12)$$

式中：

$G_{rec}$  ——循环灰排灰质量,单位为千克每小时(kg/h)。

烟道灰份额( $\alpha_{pd}$ )按式(I.13)计算：

$$\alpha_{pd} = \frac{G_{pd}}{G_{to,ash}} \left( 1 - \frac{C_{pd}}{100} \right) \times 100 \quad \dots\dots\dots (I.13)$$

式中：

$G_{pd}$  ——烟道灰(沉降灰)质量,单位为千克每小时(kg/h)。

飞灰份额( $\alpha_{as}$ )按式(I.14)计算：

$$\alpha_{as} = 100 - \alpha_{ca} - \alpha_{rec} - \alpha_{pd} \quad \dots\dots\dots (I.14)$$

添加脱硫剂后修正的理论干空气量,其值按式(I.15)计算：

$$(V_{d,ag}^0)^c = 0.088 \ 8 C_{ar}^r + 0.033 \ 3 S_{ar} + 0.264 \ 7 H_{ar} - 0.033 \ 4 O_{ar} + 0.016 \ 6 S_{ar} \frac{\eta_{SO_2}}{100} \quad \dots\dots\dots (I.15)$$

式中：

$(V_{d,ag}^0)^c$  ——添加脱硫剂后修正的理论干空气量,单位为立方米每千克( $m^3/kg$ )；

$H_{ar}$  ——收到基氢, %；

$O_{ar}$  ——收到基氧, %。

相应地,添加脱硫剂后修正的理论干烟气体积按式(I.16)计算：

$$(V_{d,fg}^0)^c = 1.865 \ 8 \frac{C_{ar}^r}{100} + 0.698 \ 9 \frac{S_{ar}}{100} + 0.79 (V_{d,ag}^0)^c + 0.800 \ 0 \frac{N_{ar}}{100} + 0.698 \ 9 \left( \frac{r_{Ca/S} \beta_{fj} - \eta_{SO_2}}{100} \right) \frac{S_{ar}}{100} \quad \dots\dots\dots (I.16)$$

式中：

$(V_{d,fg}^0)^c$  ——添加脱硫剂后修正的理论干烟气体积,单位为立方米每千克( $m^3/kg$ )；

$N_{ar}$  ——收到基氮, %。

### I.3 添加脱硫剂后过量空气系数计算

相应于添加脱硫剂后修正的理论空气量,添加脱硫剂后过量空气系数由式(I.17)定义：

$$\alpha_{ds} = \frac{(V_{d,ag})^c}{(V_{d,ag}^0)^c} \quad \dots\dots\dots (I.17)$$

式中：

$(V_{d,ag})^c$  ——添加脱硫剂后的实际干空气量,单位为立方米每千克( $m^3/kg$ )。

添加脱硫剂后的锅炉热效率计算,采用添加脱硫剂后的过量空气系数更为合适。添加脱硫剂后的过量空气系数按式(I.18)计算：

$$\alpha_{ds} = \left( \frac{O_2 (mo_{gycw} + 0.795 mo_{ilk})}{mo_{ilk} (20.95 - O_2)} + 1 \right) \times 100 \quad \dots\dots\dots (I.18)$$

式中：

$O_2$  ——收到基氧气, %；

$mo_{gycw}$  ——燃料燃烧干烟气[包括碳燃烧生成  $CO_2$ 、实际生成的  $SO_2$  (不包括脱硫吸收的硫、燃料中的  $N_2$  以及脱硫剂产生的干烟气  $CO_2$ )]的摩尔数,单位为摩尔每千克(mol/kg)。按式(I.19)计算:

$$mo_{gycw} = \frac{C_{ar}^r}{1\ 201} + (1 - \eta_{SO_2}) \frac{S_{ar}}{3\ 206.4} + \frac{N_{ar}}{2\ 801.3} + mo_{tlgy} \quad \dots\dots\dots(I.19)$$

式中:

$mo_{tlgy}$  ——脱硫剂生成烟气的摩尔数,单位为摩尔每千克(mol/kg);按式(I.20)计算:

$$mo_{tlgy} = \frac{CaCO_{3,ar} B_{shs}}{100\ 086 B} \quad \dots\dots\dots(I.20)$$

$mo_{llk}$  ——添加脱硫剂后修正的理论干空气量,单位为摩尔每千克(mol/kg)。按式(I.21)计算:

$$mo_{llk} = \frac{0.115\ 1C_{ar}^r + 0.343\ 0H_{ar} + 0.043\ 1S_{ar}(1 + 0.5\eta_{SO_2}) - 0.043\ 2O_{ar}}{28.063} \quad \dots\dots\dots(I.21)$$

#### I.4 添加脱硫剂后循环流化床锅炉热效率计算

##### I.4.1 采用正平衡测量法时锅炉热效率计算

###### I.4.1.1 输入热量的计算

循环流化床锅炉的输入热量  $Q_{in}$  按式(3)计算。

###### I.4.1.2 输出热量的计算

如冷渣器冷却工质(流化风及或冷却水)划归锅炉热平衡系统边界内,并且吸收的热量不直接输送到本锅炉,在输出热量中应计入冷渣器冷却工质吸热项(量)。

###### I.4.1.3 饱和蒸汽锅炉热效率计算

饱和蒸汽锅炉热效率计算见式(I.22):

$$\eta_1 = \frac{D_{fw} \left( h_{sat,st} - h_{fw} - \frac{\gamma\omega}{100} \right) - G_{Hum}\gamma + D_{isc} (h''_{isc} - h'_{isc})}{BQ_{in}} \times 100\% \quad \dots\dots\dots(I.22)$$

式中:

$D_{isc}$  ——冷渣器划归锅炉热平衡系统边界内冷却工质流量,单位为千克每小时(kg/h);

$h''_{isc}$  ——冷渣器划归锅炉热平衡系统边界内冷却工质出口焓值,单位为千焦每千克(kJ/kg);

$h'_{isc}$  ——冷渣器划归锅炉热平衡系统边界内冷却工质进口焓值,单位为千焦每千克(kJ/kg)。

###### I.4.1.4 过热蒸汽锅炉热效率计算

过热蒸汽锅炉热效率计算见式(I.23):

$$\eta_1 = \frac{D_{fw} (h_{st,SH,lv} - h_{fw}) - G_{Hum}\gamma + D_{isc} (h''_{isc} - h'_{isc})}{BQ_{in}} \times 100\% \quad \dots\dots\dots(I.23)$$

###### I.4.1.5 热水锅炉热效率计算

热水锅炉热效率计算见式(I.24):

$$\eta_1 = \frac{G (h_{ow} - h_{fw}) + D_{isc} (h''_{isc} - h'_{isc})}{BQ_{in}} \times 100\% \quad \dots\dots\dots(I.24)$$

#### I.4.2 采用反平衡测量法时锅炉热效率计算

采用反平衡测量法时锅炉热效率计算见式(I.25)：

$$\begin{aligned}\eta_1 &= 100 - \frac{Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 + Q_7}{Q_r} \times 100 \\ &= 100 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6 + q_7) \quad \dots\dots\dots (I.25)\end{aligned}$$

式中：

$Q_2$ ——烟气带走的热量，单位为千焦每千克或千焦每立方米(kJ/kg 或 kJ/m<sup>3</sup>)；

$Q_3$ ——气体不完全燃烧热损失量，单位为千焦每千克或千焦每立方米(kJ/kg 或 kJ/m<sup>3</sup>)；

$Q_4$ ——固体不完全燃烧热损失量，单位为千焦每千克(kJ/kg)；

$Q_5$ ——锅炉散热损失量，单位为千焦每千克或千焦每立方米(kJ/kg 或 kJ/m<sup>3</sup>)；

$Q_6$ ——灰渣物理热损失量，即炉渣、循环灰、烟道灰(沉降灰)和飞灰等排出锅炉设备时所带走的显热，单位为千焦每千克(kJ/kg)；

$Q_7$ ——脱硫热损失量，单位为千焦每千克(kJ/kg)；

$q_7$ ——石灰石脱硫热损失，%。

##### I.4.2.1 排烟热损失

锅炉排烟热损失  $q_2$  按式(I.26)计算：

$$q_2 = \frac{Q_2}{Q_{in}} \times 100 \quad \dots\dots\dots (I.26)$$

$Q_2$  按式(I.27)计算：

$$Q_2 = h_{ds} - h_{ca} \quad \dots\dots\dots (I.27)$$

式中：

$h_{ca}$ ——入炉冷空气焓，单位为千焦每千克(kJ/kg)。按式(I.28)计算：

$$h_{ca} = \alpha_{ds} (V_{d,ag}^0)^c (ct)_{ca} \quad \dots\dots\dots (I.28)$$

$h_{ds}$ ——排烟处烟气焓，单位为千焦每千克(kJ/kg)。按式(I.29)计算：

$$h_{ds} = V_{d,fg} c_{d,fg} t_{ds} + V_{H_2O} c_{H_2O} t_{ds} \quad \dots\dots\dots (I.29)$$

式中：

$V_{d,fg}$ ——排烟处干烟气体积，单位为立方米每千克(m<sup>3</sup>/kg)。按式(I.30)计算：

$$V_{d,fg} = (V_{d,fg}^0)^c + (\alpha_{ds} - 1) (V_{d,ag}^0)^c \quad \dots\dots\dots (I.30)$$

$c_{d,fg}$ ——排烟处干烟气平均比定压热容，单位为千焦每立方米摄氏度[kJ/(m<sup>3</sup>·°C)]；

$c_{H_2O}$ ——排烟处水蒸气平均比定压热容，单位为千焦每立方米摄氏度[kJ/(m<sup>3</sup>·°C)]；

$V_{H_2O}$ ——排烟处水蒸气体积，单位为立方米每千克(m<sup>3</sup>/kg)。按式(I.31)计算：

$$V_{H_2O} = 0.111 H_{ar} + 0.012 4 M_{ar} + 0.016 1 (V_{d,ag}^0)^c + 1.24 \times \frac{100.086}{32.066} \frac{S_{ar}}{CaCO_3} r_{Ca/S} M_t^{shs} \quad \dots\dots\dots (I.31)$$

式中：

$M_t^{shs}$ ——石灰石含水量，%。

##### I.4.2.2 气体不完全燃烧热损失

循环流化床锅炉中气体不完全燃烧产物热损失  $q_3$  按式(I.32)计算：

$$q_3 = \frac{1}{Q_{in}} V_{d,fg} (126.36 CO + 358.18 CH_4 + 107.98 H_2 + 590.79 C_m H_n) \times 100 \quad \dots\dots\dots (I.32)$$

**I.4.2.3 固体不完全燃烧热损失**

循环流化床锅炉中固体不完全燃烧热损失  $q_4$  按式(I.33)计算:

$$q_4 = \frac{337.27A_{js}\bar{C}}{Q_{in}} \dots\dots\dots(I.33)$$

**I.4.2.4 散热损失**

循环流化床锅炉在额定蒸发量(热功率)下的散热损失  $q_{5r}$  [计算见式(I.34)]计算方法为:按附录 F 表 F.1 中查得  $q_{5lt}$ ,再乘以面积修正系数  $f_{xz}$  [计算见式(I.35)]得出  $q_{5ed}$  :

$$q_{5r} = q_{5lt} \times f_{xz} \dots\dots\dots(I.34)$$

$$f_{xz} = \frac{F_Z}{F_Z - F_{fl}} \dots\dots\dots(I.35)$$

式中:

$q_{5r}$  ——锅炉在额定蒸发量(热功率)下的散热损失, %;

$F_Z$  ——锅炉散热总表面积,单位为平方米( $m^2$ );

$F_{fl}$  ——锅炉分离回送系统等的表面积之和,包括分离器、立管和回料阀的表面积,单位为平方米( $m^2$ )。

当锅炉在其他蒸发量(热功率)下运行时,  $q_5$  按式(I.36)或式(I.37)计算:

$$q_5 = \frac{q_{5r}D_r}{D_{out}} \dots\dots\dots(I.36)$$

$$q_5 = \frac{q_{5r}Q_r}{D_{out}} \dots\dots\dots(I.37)$$

循环流化床锅炉散热损失也可通过实际测量锅炉散热量计算得出,测量方法按附录 F 和 GB/T 8174。

**I.4.2.5 灰渣物理热损失**

灰渣物理热量损失等于炉渣、循环灰、烟道灰和飞灰排出锅炉设备时所带走的显热,按式(I.38)计算:

$$q_6 = \frac{A_{js}}{Q_{in}} \left[ \frac{\alpha_{ca}(t_{ca} - t_0) c_{ca}}{100 - C_{ca}} + \frac{\alpha_{as}(t_{ds} - t_0) c_{as}}{100 - C_{as}} + \frac{\alpha_{rec}(t_{ex,rec} - t_0) c_{rec}}{100 - C_{rec}} + \frac{\alpha_{pa}(t_{pa} - t_0) c_{pa}}{100 - C_{pa}} \right] \dots\dots\dots(I.38)$$

式中:

$t_{ex,rec}$  ——实测离开锅炉热平衡系统边界的循环灰温度,单位为摄氏度( $^{\circ}C$ );

$t_{pd}$  ——烟道灰(沉降灰)温度,单位为摄氏度( $^{\circ}C$ );

$c_{ca}$  ——冷灰(炉底渣)比热,单位为千焦每千克摄氏度[kJ/(kg· $^{\circ}C$ )];

$c_{as}$  ——飞灰比热,单位为千焦每千克摄氏度[kJ/(kg· $^{\circ}C$ )];

$c_{rec}$  ——循环灰比热,单位为千焦每千克摄氏度[kJ/(kg· $^{\circ}C$ )];

$c_{pa}$  ——烟道灰(沉降灰)比热,单位为千焦每千克摄氏度[kJ/(kg· $^{\circ}C$ )].

$c_{as}$  可按式(I.39)计算:

$$c_{as} = 0.71 + 5.02 \times 10^{-4} t_{as} \dots\dots\dots(I.39)$$

式中:

$t_{as}$  ——飞灰温度,单位为摄氏度( $^{\circ}C$ )。

如冷渣器冷却工质划归锅炉热平衡系统边界内,则  $t_{ca}$  为冷渣器实测出口温度;如冷渣器冷却工质

划归锅炉热平衡系统边界外,则  $t_{ca}$  可取循环流化床锅炉密相区平均温度。

#### I.4.2.6 石灰石脱硫热损失

添加脱硫剂后的煅烧吸热反应和硫酸盐化放热反应化学反应式分别见式(I.40)和式(I.41):



石灰石脱硫热损失  $q_7$  按式(I.42)计算:

$$q_7 = \frac{S_{ar} (57.19 r_{Ca/S} \beta_{fj} - 151.59 \eta_{SO_2})}{Q_{in}} \quad \dots\dots\dots (\text{ I.42 } )$$



附录 J  
(资料性附录)

烟气、灰和空气的平均比定压热容、常用气体的有关量值、常用法定计量单位及其换算

J.1 烟气、灰和空气的平均比定压热容,见表 J.1。

表 J.1 烟气、灰和空气的平均比定压热容

温度 <sup>a</sup> °C	平均比定压热容 $c$ kJ/(m <sup>3</sup> ·°C)								
	RO <sub>2</sub> (即: CO <sub>2</sub> +SO <sub>2</sub> )	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	CO	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	灰	空气
0	1.599 8	1.294 6	1.305 9	1.494 3	1.299 2	1.276 6	1.550 0	0.795 5	1.318 3
10	1.609 9	1.294 7	1.307 1	1.495 4	1.299 5	1.278 0	1.559 1	0.799 7	1.319 4
20	1.619 9	1.294 8	1.308 3	1.496 5	1.299 7	1.279 4	1.568 2	0.803 9	1.320 0
30	1.629 9	1.294 9	1.309 5	1.497 6	1.300 0	1.280 8	1.577 3	0.808 1	1.320 6
40	1.639 9	1.295 0	1.310 7	1.498 7	1.300 2	1.282 2	1.586 4	0.812 3	1.321 2
50	1.649 9	1.295 1	1.311 9	1.499 8	1.300 5	1.283 6	1.595 5	0.816 5	1.321 8
100	1.700 3	1.295 8	1.317 6	1.505 2	1.301 7	1.290 8	1.641 1	0.837 4	1.324 3
150	1.743 8	1.297 8	1.326 6	1.513 7	1.304 0	1.294 0	1.700 0	0.852 1	1.328 1
160	1.752 5	1.298 2	1.328 4	1.515 4	1.304 6	1.294 6	1.711 8	0.855 0	1.328 9
170	1.761 2	1.298 6	1.330 2	1.517 1	1.305 2	1.295 2	1.723 6	0.857 9	1.329 7
180	1.769 9	1.299 0	1.332 0	1.518 8	1.305 8	1.295 8	1.735 4	0.860 8	1.330 5
190	1.778 6	1.299 4	1.333 8	1.520 5	1.306 6	1.296 4	1.747 2	0.863 7	1.331 3
200	1.787 3	1.099 6	1.335 2	1.522 3	1.307 1	1.297 1	1.758 9	0.866 7	1.331 8
300	1.862 7	1.306 7	1.356 1	1.542 4	1.316 7	1.299 2	1.886 1	0.891 8	1.342 3
600	—	—	—	—	—	—	—	0.950 4	—
800	—	—	—	—	—	—	—	0.979 7	—
900	—	—	—	—	—	—	—	1.004 8	—

<sup>a</sup> 低于 0 °C 时可按外插法延伸。

J.2 常用气体的有关量值,见表 J.2。

表 J.2 常用气体的有关量值

名称	分子式	密度 kg/m <sup>3</sup>	沸点 °C	低位发热值 MJ/m <sup>3</sup>
甲烷	CH <sub>4</sub>	0.716 8	-161.5	35.773
乙烷	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	1.357 0	-88.6	63.669

表 J.2 (续)

名称	分子式	密度 kg/m <sup>3</sup>	沸点 °C	低位发热值 MJ/m <sup>3</sup>
乙烯	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	1.261 0	-103.5	58.989
乙炔	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	1.170 9	-83.6	55.983
丙烷	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	2.020 0	-42.6	91.121
丙烯	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	1.914	-47	85.894
丁烷	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	2.703	0.5	118.498
异丁烷	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	2.668	-10.2	117.921
丁烯	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	2.5	-6	113.367
戊烷	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	3.457	36.1	145.896
硫化氢	H <sub>2</sub> S	1.539 0	-60.4	23.354
氢	H <sub>2</sub>	0.089 9	-252.78	10.784
一氧化碳	CO	1.250 0	-191.5	12.636
二氧化碳	CO <sub>2</sub>	1.976 8	-78.48	—
二氧化硫	SO <sub>2</sub>	2.926 3	-10.0	—
水蒸气	H <sub>2</sub> O	0.804	100.00	—
氧	O <sub>2</sub>	1.428 95	-182.97	—
氮	N <sub>2</sub>	1.250 5	-195.81	—
空气(干)		1.292 8	-193	—
一氧化氮	NO	1.340 2	-152	—
一氧化二氮	N <sub>2</sub> O	1.978 0	-88.7	—

J.3 常用法定计量单位及其换算,见表 J.3。

表 J.3 常用法定计量单位及其换算

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 $\mu$ m nm km	1 dm=1/10 m 1 cm=1/100 m 1 mm=1/1 000 m 1 $\mu$ m=1/1 000 mm 1 nm=10 <sup>-6</sup> 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

表 J.3 (续)

序号	量的名称	法定单位		换算及常用英制单位
		名称	符号	
3	面积	平方米	m <sup>2</sup>	1 ft <sup>2</sup> = 0.092 9 m <sup>2</sup> 1 in <sup>2</sup> = 6.4516 × 10 <sup>-5</sup> m <sup>2</sup>
4	体积 容积	立方米 升 立方厘米	m <sup>3</sup> L cm <sup>3</sup>	1 L = 1 dm <sup>3</sup> = 10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup> 1 cm <sup>3</sup> = 10 <sup>-3</sup> L 1 cc = 1 cm <sup>3</sup> = 10 <sup>-3</sup> L 1 ft <sup>3</sup> = 2.832 × 10 <sup>-2</sup> m <sup>3</sup> = 28.32 L 1 in <sup>3</sup> = 1.638 7 × 10 <sup>-5</sup> m <sup>3</sup> = 1.638 7 × 10 <sup>-2</sup> 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(公斤力) = 9.806 5 N 1 lbf(磅力) = 4.448 222 N
7	压力 压强 应力	帕(斯卡)	Pa	1 kgf/m <sup>2</sup> = 9.806 65 Pa 1 kgf/cm <sup>2</sup> = 9.806 65 × 10 <sup>4</sup> Pa = 0.098 066 5 MPa 1 kgf/mm <sup>2</sup> = 9.806 65 MPa 1 bar = 10 <sup>5</sup> Pa 1 mmHg = 133.322 4 Pa 1 mmH <sub>2</sub> O = 9.806 65 Pa 1 Torr = 133.322 4 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 <sup>2</sup> (磅力/英尺 <sup>2</sup> ) = 47.880 3 Pa 1 lbf/in <sup>2</sup> (磅力/英寸 <sup>2</sup> ) = 6 894.757 Pa
8	能 功 热	焦(耳) 千瓦小时	J kWh	1 kW · h = 3.6 × 10 <sup>6</sup> J 1 kgf · m = 9.806 65 J 1 cal = 4.186 8 J 1 ft · lbf(英尺磅力) = 1.355 82 J 1 Btu(英热单位) = 105 5 J
9	功率	瓦特 千瓦	W kW	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) = 105 5 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 <sup>2</sup>	1 g <sub>s</sub> (标准重力加速度) = 9.806 65 m/s <sup>2</sup>
12	流量	立方米每小时 升每分	m <sup>3</sup> /h L/min	1 L/min = 0.060 00 m <sup>3</sup> /h 1 kgf(公斤力) = 9.806 65 N 1 lbf(磅力) = 4.448 222 N

表 J.3 (续)

序号	量的名称	法定单位		换算及常用英制单位
		名称	符号	
13	温度	开(尔文) 摄氏度 华氏度	K °C °F	$0\text{ }^{\circ}\text{C}=273.15\text{ K}$ $5/9(^{\circ}\text{F}-32)=^{\circ}\text{C}$ $\Delta 1\text{ }^{\circ}\text{F}=0.555\ 556\text{ K}$
14	密度	千克每立方米	kg/m <sup>3</sup>	1 lb/ft <sup>3</sup> (磅每立方英尺)=16.01 kg/m <sup>3</sup>
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 <sup>3</sup>	1 kcal/(m <sup>3</sup> ·h)=1.163 W/m <sup>3</sup> 1 Btu/(ft <sup>3</sup> ·h)=10.347 W/m <sup>3</sup>
17	面积热强度	瓦特每平方米	W/m <sup>2</sup>	1 kcal/(m <sup>2</sup> ·h)=1.163 W/m <sup>2</sup> 1 Btu/(ft <sup>2</sup> ·h)=3.154 W/m <sup>2</sup>
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/(1 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 <sup>3</sup>	1 g/L=1 kg/m <sup>3</sup>
20	传热系数	焦耳每平方米开(尔文)	W/(m <sup>2</sup> ·K)	1 kcal/(m <sup>2</sup> ·h·°C)=1.163 W/(m <sup>2</sup> ·K) 1 Btu/(ft <sup>2</sup> ·h·°F)=4.882 kcal/(m <sup>2</sup> ·h·°C) =5.678 W/(m <sup>2</sup> ·K)
21	热导率 (导热系数)	瓦特每米开(尔文)	W/(m·K)	1 kcal/(m <sup>2</sup> ·h·°C)=1.163 W/(m <sup>2</sup> ·K) 1 Btu/(ft <sup>2</sup> ·h·°F)=1.488 kcal/(m <sup>2</sup> ·h·°C) =1.730 7 W/(m <sup>2</sup> ·K)