



中华人民共和国国家标准

GB 10184—88

电站锅炉性能试验规程

Performance test code for utility boiler

1988-12-22 发布

1989-07-01 实施

国家技术监督局 发布

目 次

1 主题内容与适用范围	(1)
2 引用标准	(1)
3 术语、符号、代号	(2)
4 导则	(10)
5 测试方法及测量仪表	(13)
6 热效率计算	(26)
7 换算到保证条件下的热效率	(35)
8 锅炉净效率	(36)
9 锅炉蒸发量、蒸汽参数及其他运行特性试验	(37)
10 误差分析	(45)
11 试验报告	(48)
附录 A 常用法定计量单位及其换算(参考件)	(53)
附录 B 各种气体浓度的 ppm 与 mg/m ³ 换算(参考件)	(56)
附录 C 常用气体及灰的特性(补充件)	(57)
附录 D 煤、灰的比热(补充件)	(59)
附录 E 锅炉灰渣平衡百分率(补充件)	(60)
附录 F 额定负荷下锅炉散热损失(补充件)	(61)
附录 G 湿空气线算图(补充件)	(62)
附录 H 网格法等截面的划分原则及代表点的确定(补充件)	(63)
附录 I 流量测量节流装置中差压传送管路的布设(补充件)	(66)
附录 J 弹簧管压力计读数修正及液柱式压力计常用封液和使用(补充件)	(70)
附录 K 空气预热器漏风率的测定与计算(补充件)	(72)
附录 L 疏失误差的消除方法(参考件)	(73)
附录 M 误差计算实例(参考件)	(75)
附录 N 温度测量装置(补充件)	(90)
附录 O 烟气多点取样混合器(补充件)	(97)
附录 P 沉降灰收集器(补充件)	(98)
附录 Q 水、汽取样装置(补充件)	(99)

中华人民共和国国家标准

电站锅炉性能试验规程

GB 10184—88

Performance test code for utility boiler

1 主题内容与适用范围

本标准规定了电站锅炉性能试验方法,作为锅炉性能鉴定试验和验收试验(以下统称验收试验)的依据。

本标准适用于蒸发量为 35t/h 或 35t/h 以上、蒸汽出口压力高于 2.45MPa 或蒸汽出口温度超过 400℃ 的蒸汽锅炉。其他参数发电锅炉的性能试验亦可参照使用。

本标准也适用于为了其他目的(如工况调整、燃料变动、设备改进等)而进行的锅炉热效率试验。

本标准不适用于核电站蒸汽发生器的性能试验。

2 引用标准

- GB 211 煤中全水分测定方法
- GB 212 煤的工业分析方法
- GB 214 煤中全硫的测定方法
- GB 218 煤中碳酸盐的二氧化碳含量测定法
- GB 219 煤熔融性的测定方法
- GB 260 石油产品水分测定方法
- GB 261 石油产品闪点测定法(闭口杯法)
- GB 265 石油产品运动粘度测定法
- GB 266 石油产品恩氏粘度测定法
- GB 267 石油产品闪点与燃点测定法(开口杯法)
- GB 268 石油产品残碳测定法
- GB 380 石油产品硫含量测定法(燃灯法)
- GB 384 石油产品热值测定法
- GB 388 石油产品硫含量测定法(氧弹法)
- GB 474 煤样缩制方法
- GB 476 煤的元素分析方法
- GB 483 煤质分析方法一般规定
- GB 508 石油产品灰分测定法
- GB 510 石油产品凝点测定法
- GB 1033 波纹管压力计
- GB 1226 一般压力表
- GB 1227 精密压力表
- GB 1598 工业热电偶用铂铑₁₃-铂偶丝
- GB 1608 电接点压力表
- GB 1884 石油和液体石油产品密度测定法(密度计法)

GB 2538	原油试验方法
GB 2540	石油产品密度测定法
GB 2565	煤的可磨性试验方法
GB 2586	热能单位符号与换算
GB 2587	热平衡通则
GB 2588	设备热效率计算方法通则
GB 2614	镍铬—镍硅热电偶丝及分度表
GB 2624	流量测量节流装置
GB 2902	铂铑 ₃₀ —铂铑 ₆ 热电偶丝及分度表
GB 2903	铜—康铜热电偶丝及分度表
GB 3101	有关量、单位和符号的一般原则
GB 3486	评价企业合理用热技术导则
GB 3772	铂铑 ₁₀ —铂热电偶丝及分度表
GB 3927	直流电位差计
GB 3930	测量热电阻用直流电桥
GB 4270	热工图形符号与文字代号
GB 4274	设备及管道保温技术通则
GB 4882	正态性试验
JB 470	膜盒压力表
JB 913	工业用热电偶技术条件
JB 1064	实验室玻璃温度计型式、基本参数及尺寸
JB 1066	实验室玻璃温度计技术条件
RS—1—1	燃煤采样
RS—3—1	燃油、飞灰和炉渣试样的制备
RS—4—2	粒度为 3mm 以下煤样外在水分的快速测定
RS—26—1	飞灰和炉渣中可燃物测定
RS—28—1	燃油采样
SS—2—1	水、汽样品的采集

3 术语、符号、代号

3.1 术语、定义

3.1.1 电站锅炉

利用燃料燃烧释放的热能加热给水,以获得规定参数(温度、压力)和品质的蒸汽,并主要用于发电的锅炉机组。通常由锅炉本体、燃料及烟风系统、测量控制系统和其他辅助设备组成。

3.1.2 输入热量

随每千克或每标准立方米燃料输入锅炉能量平衡系统的总热量,包括燃料的应用基低位发热量、物理显热、用外来热源加热燃料或空气时所带入的热量以及雾化燃油所用蒸汽带入的热量。

3.1.3 输出热量

相对每千克或每标准立方米燃料,工质在锅炉能量平衡系统中所吸收的总热量,以及排污水和其他外用蒸汽所消耗的热量等。

3.1.4 额定蒸发量

锅炉在额定蒸汽(包括再热器进口蒸汽)参数、额定给水温度、使用设计燃料并保证效率时所规定的蒸发量。

3.1.5 最大连续蒸发量

锅炉在额定蒸汽参数、额定给水温度、并使用设计燃料、安全连续运行时能达到的最大蒸发量。

3.1.6 最低稳定燃烧负荷及液态排渣临界负荷

锅炉在低负荷运行时,能够长期稳定燃烧所能维持的最低蒸发量。对于燃煤锅炉,为不必辅以油(或气体燃料)助燃的最低稳定燃烧时的蒸发量。液态排渣炉稳定流渣的最低负荷称之为液态排渣临界负荷。

3.1.7 漏风系数及漏风率

a. 漏风系数:烟气通道出、进口处烟气的过量空气系数之差,或空气通道进、出口处空气量差值与理论空气量之比。

b. 漏风率:漏入某段烟道烟气侧的空气量占该段烟道烟气质量的百分率。

3.1.8 锅炉热效率

锅炉热效率为输出热量占输入热量的百分率。

3.2 符号、代号

本规程采用汉语拼音字母作为主要角标。用大写字母表示锅炉机组设备,用小写字母表示燃料、工质等。

表1为非汉语拼音(不包括数字)的角标、上标及前缀;表2为本规程采用的符号一览表。

本标准中所采用的立方米 m^3 ,除有特殊说明外,均指标准状态下的立方米。

表 1

角 码	说 明	位 置	角 码	说 明	位 置
o	理论的	上角标	v	真空	下角标
b	保证的	上角标	p	定压	下角标
i	进 口	上角标	c	定容	下角标
o	出 口	上角标	o	基准状态;相对的	下角标
e	额定的	上角标	I、II	受热面级数	下角标
max	最大的	上角标或 下角标	n	标准状态	下角标
min	最小的	上角标或 下角标	Δ	差值	前缀
—	平均的	上标	Σ	总的	前缀

表 2

符 号	说 明	单 位
一、热平衡		
Q_1	相应于每千克(或每标准立方米)燃料的锅炉输出热量	kJ/kg, kJ/m^3
Q_2	相应于每千克(或每标准立方米)燃料的锅炉输入热量	kJ/kg, kJ/m^3
η	锅炉热效率(毛效率) %	
η_1	锅炉净效率 %	
b	电厂标准煤耗	$\text{kg}/(\text{kW} \cdot \text{h})$
ΣP	锅炉设备辅机、电动机功率之和	kW
Q_{27}	锅炉自用热量	kJ/kg, kJ/m^3
Q_{2w}	燃料应用基低位发热量	kJ/kg, kJ/m^3
Q_{2s}	燃料物理显热	kJ/kg, kJ/m^3
Q_{-1}	外来热源加热空气所带入的热量	kJ/kg, kJ/m^3
Q_{-2}	雾化蒸汽带入的热量	kJ/kg, kJ/m^3
Q_3	每千克(或每标准立方米)燃料排烟损失热量	kJ/kg, kJ/m^3
Q_4	每千克(或每标准立方米)燃料可燃气体未完全燃烧损失热量	kJ/kg, kJ/m^3
Q_5	每千克(或每标准立方米)燃料固体未完全燃烧损失热量	kJ/kg, kJ/m^3
Q_6	每千克(或每标准立方米)燃料锅炉散热损失热量	kJ/kg, kJ/m^3
Q_7	每千克(或每标准立方米)燃料灰渣物理显热损失热量	kJ/kg, kJ/m^3
q_1	排烟热损失百分率	
q_2	可燃气体未完全燃烧热损失百分率	
q_3	固体未完全燃烧热损失百分率	
q_4	锅炉散热损失百分率	
q_5	额定蒸发量时的散热损失百分率	
q_6	灰渣物理热损失百分率	
t_0	基准温度	$^{\circ}\text{C, K}$
二、水和蒸汽		
D	锅炉蒸发量	t/h
D^e	锅炉额定蒸发量	t/h
D_{B1}	过热蒸汽流量(主蒸汽流量)	t/h
D_{B2}	排污水流量	t/h
D_{B3}	再热器入口蒸汽流量	t/h
D_{B4}	饱和蒸汽抽出量	t/h
D_{B5}	再热蒸汽减温水流量	t/h
h_{B1}	给水焓	kJ/kg
h_{B2}	饱和水焓	kJ/kg
h_{B3}	饱和蒸汽焓	kJ/kg
h_{B4}	再热蒸汽减温水焓	kJ/kg
h_{B5}	过热蒸汽焓(主蒸汽焓)	kJ/kg
h_{B6}	再热器进口蒸汽焓	kJ/kg
h_{B7}	再热器出口蒸汽焓	kJ/kg
h_{B8}	雾化蒸汽焓	kJ/kg
$(h_{B9})_0$	基准温度时的饱和汽焓	kJ/kg
T_{B1}	过热蒸汽温度(主蒸汽温度)	$^{\circ}\text{C, K}$
T_{B2}	饱和蒸汽温度	$^{\circ}\text{C, K}$
T_{B3}	饱和水温度	$^{\circ}\text{C, K}$
T_{B4}^0	给水温度(设计值或保证值)	$^{\circ}\text{C, K}$
T_{B5}	实测给水温度	$^{\circ}\text{C, K}$
P_{B1}	过热蒸汽压力(主蒸汽压力)	MPa
P_{B2}	给水压力	MPa
P_{B3}	饱和蒸汽压力	MPa
P_{B4}, P_{B5}	再热蒸汽进口和出口压力	MPa

续表 2

符 号	说 明	单 位
三、燃料和灰渣		
C', C''	分别为燃料分析基和应用基碳质量含量百分率	
H', H''	分别为燃料分析基和应用基氢质量含量百分率	
S', S''	分别为燃料分析基和应用基硫质量含量百分率	
O', O''	分别为燃料分析基和应用基氧质量含量百分率	
N', N''	分别为燃料分析基和应用基氮质量含量百分率	
A', A''	分别为燃料分析基和应用基灰分质量含量百分率	
W', W''	分别为燃料分析基和应用基水分质量含量百分率	
V'	燃料可燃基挥发分	
A^s	燃料干燥基灰分	
C_f	燃料应用基实际燃烧掉的碳质量含量百分率	
A_m	燃料折算灰分	
Q_{6w}, Q_{6w}''	分别为燃料分析基和应用基低位发热量	$\text{kJ/kg}, \text{kJ/m}^3$
Q_{6w}	石子煤低位发热量	kJ/kg
Q_{6w}, Q_{6w}''	分别为燃料分析基和应用基高位发热量	$\text{kJ/kg}, \text{kJ/m}^3$
Q_m	燃料解冻热量	kJ/kg
CO	气体燃料中 CO 体积含量百分率	
H_2	气体燃料中 H_2 体积含量百分率	
O_2	气体燃料中 O_2 体积含量百分率	
N_2	气体燃料中 N_2 体积含量百分率	
CH_4	气体燃料中 CH_4 体积含量百分率	
CO_2	气体燃料中 CO_2 体积含量百分率	
H_2S	气体燃料中 H_2S 体积含量百分率	
H_2O	气体燃料中 H_2O 体积含量百分率	
C_mH_n	气体燃料中 C_mH_n 体积含量百分率	
B	锅炉每小时燃料消耗量	$\text{kg/h}, \text{m}^3/\text{h}$
B_m	石子煤量	kg/h
β	燃料特性系数	—
t_s	固体燃料温度	$^\circ\text{C}, \text{K}$
$t_{s,70}$	燃油温度	$^\circ\text{C}, \text{K}$
$t_{g,1}$	气体燃料温度	$^\circ\text{C}, \text{K}$
ρ_{20}	标准状态下的气体燃料密度	kg/m^3
μ_b	气体燃料中含灰浓度	g/m^3
d_g	气体燃料的湿度	g/m^3
C_s	固体燃料比热	$\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
C_s^s	固体燃料干燥基比热	$\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
$C_{s,70}$	燃油比热	$\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
$C_{g,1}$	气体燃料比热	$\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$
R_{45}	45 μm 孔径标准筛子上的煤粉剩余量占试样质量的百分率	
R_{90}	90 μm 孔径标准筛子上的煤粉剩余量占试样质量的百分率	
R_{200}	200 μm 孔径标准筛子上的煤粉剩余量占试样质量的百分率	
R_{1000}	1000 μm 孔径标准筛子上的煤粉剩余量占试样质量的百分率	
n	煤粉颗粒特性均匀系数	—
T_1, t_1	煤灰开始变形温度	$\text{K}, ^\circ\text{C}$
T_2, t_2	煤灰开始软化温度	$\text{K}, ^\circ\text{C}$
T_3, t_3	煤灰开始熔融温度	$\text{K}, ^\circ\text{C}$
a_m	炉渣中灰量占总灰量的质量百分率	
a_n	飞灰中灰量占总灰量的质量百分率	
a_{sp}	沉降灰中灰量占总灰量的质量百分率	
a_{1m}	漏煤中灰量占总灰量的质量百分率	
C_{1s}	炉渣中可燃物质量百分率	
C_{1n}	飞灰中可燃物质量百分率	
C_{sp}	沉降灰中可燃物质量百分率	
C_{1m}	漏煤中可燃物质量百分率	
\bar{C}	灰渣中平均碳量与燃煤灰量之比, %	

续表 2

符 号	说 明	单 位
t_{L}	炉渣温度	℃, K
t_{h}	飞灰温度	℃, K
t_{p}	沉降灰温度	℃, K
t_{m}	漏煤温度	℃, K
C_{a}	灰的比热	kJ/(kg·K)
C°	可燃物质比热	kJ/(kg·K)
四、烟气和空气		
Q°	干烟气带走的热量	kJ/kg, kJ/m ³
$Q_{\text{H}_2\text{O}}^{\circ}$	烟气所含水蒸汽的显热	kJ/kg, kJ/m ³
V_{w}	每千克(或每标准立方米)燃料燃烧生成的干烟气体积	m ³ /kg, m ³ /m ³
θ_{w}	锅炉排烟温度	℃, K
$\theta_{\text{w}}^{\circ}$	锅炉保证或设计排烟温度	℃, K
$\theta_{\text{m}}, \theta_{\text{m}}^{\circ}$	省煤器进口和出口(沿烟气流向)烟气温度	℃, K
θ_{a}	空气预热器进口烟气温度	℃, K
μ	排烟中碳浓度	g/m ³
α	烟气的过量空气系数	
$\alpha_{\text{w}}^{\circ}$	实测排烟过量空气系数	
$C_{\text{a}} \cdot v$	干烟气的平均定压比热	kJ/(m ³ ·K)
$C_{\text{a}} \cdot \text{CO}_2$	二氧化碳气体的平均定压比热	kJ/(m ³ ·K)
$C_{\text{a}} \cdot \text{O}_2$	氧气的平均定压比热	kJ/(m ³ ·K)
$C_{\text{a}} \cdot \text{N}_2$	氮气的平均定压比热	kJ/(m ³ ·K)
$C_{\text{a}} \cdot \text{CO}$	一氧化碳气体的平均定压比热	kJ/(m ³ ·K)
RO_2	烟气中三原子气体(即 $\text{CO}_2 + \text{SO}_2$)的体积含量百分率	
O_2	烟气中氧的体积含量百分率	
N_2	烟气中氮的体积含量百分率	
CO	烟气中一氧化碳的体积含量百分率	
CH_4	烟气中甲烷的体积含量百分率	
H_2	烟气中氢的体积含量百分率	
C_mH_n	烟气中碳氢化合物的体积含量百分率	
$V_{\text{H}_2\text{O}}$	烟气中所含水蒸气容积	m ³ /m ³
ϕ	空气相对湿度	
d_{a}	空气绝对湿度	kg/kg(干空气)
d_{g}	气体燃料的湿度	kg/kg(干气体)
p_{atm}	就地实测的大气压	Pa
(p_{a})	基准温度下水蒸气的饱和压力	Pa
$C_{\text{a}} \cdot \text{H}_2\text{O}$	水蒸气的平均定压比热	kJ/(m ³ ·K)
V_{a}	进入空气预热器的空气量	m ³ /h
t_{a}	空气预热器进口空气温度	℃, K
C_{a}°	空气预热器进口空气温度下的空气定压比热	kJ/(m ³ ·K)
$(C_{\text{a}})_{\text{a}}$	基准温度下空气的定压比热	kJ/(m ³ ·K)
β_{a}	空气预热器进口空气量与理论空气量之比	
(h_{a})	基准温度下空气的焓	kJ/m ³
$(h_{\text{a}})^{\circ}$	空气预热器进口空气温度下的理论空气焓	kJ/m ³
h_{a}°	暖风器(前置预热器)进口工质的焓	kJ/m ³
h_{a}°	暖风器(前置预热器)出口工质的焓	kJ/m ³
V_{a}°	按燃料应用基成分计算的理论干空气量	m ³ /kg, m ³ /m ³
V_{a}°	按燃料应用基成分计算的理论干烟气体积	m ³ /kg, m ³ /m ³
$(V_{\text{a}}^{\circ})^{\circ}$	按燃料应用基成分,由实际燃烧掉的碳计算的理论干空气量	m ³ /kg
$(V_{\text{a}}^{\circ})^{\circ}$	按燃料应用基成分,由实际燃烧掉的碳计算的理论干烟气体积	m ³ /kg

3.3 锅炉热效率的求取法

3.3.1 输入-输出热量法热效率,即直接测量锅炉输入和输出热量求得热效率。此法又称正平衡法。

$$\text{锅炉热效率} = \frac{\text{输出热量}}{\text{输入热量}} \times 100\% \quad \dots\dots\dots(1)$$

3.3.2 热损失法热效率,即由确定各项热量损失求得热效率。此法又称反平衡法。

$$\text{锅炉热效率} = (1 - \frac{\text{各项损失热量之和}}{\text{输入热量}}) \times 100\% \quad \dots\dots\dots(2)$$

3.3.3 采用第3.3.1条或3.3.2条测定锅炉热效率的热平衡系统界限见图1,热量平衡关系见图2。

3.3.4 对于电站锅炉验收试验,本标准规定采用热损失法测定热效率。也可辅以输入-输出热量法热效率作为参考。

3.3.5 按本标准第6、7章所得的热效率为锅炉毛效率。必要时,根据第8章中所述方法求净效率。

3.3.6 简化热效率

简化热效率,是指仅考虑主要热损失且仅将燃料应用基低位发热量当作输入热量的锅炉热效率(见本标准第6.4条)。必要时,对某些参数的测试方法也可作适当的简化。

本条仅适用于在某些场合下经协商同意的验收试验。

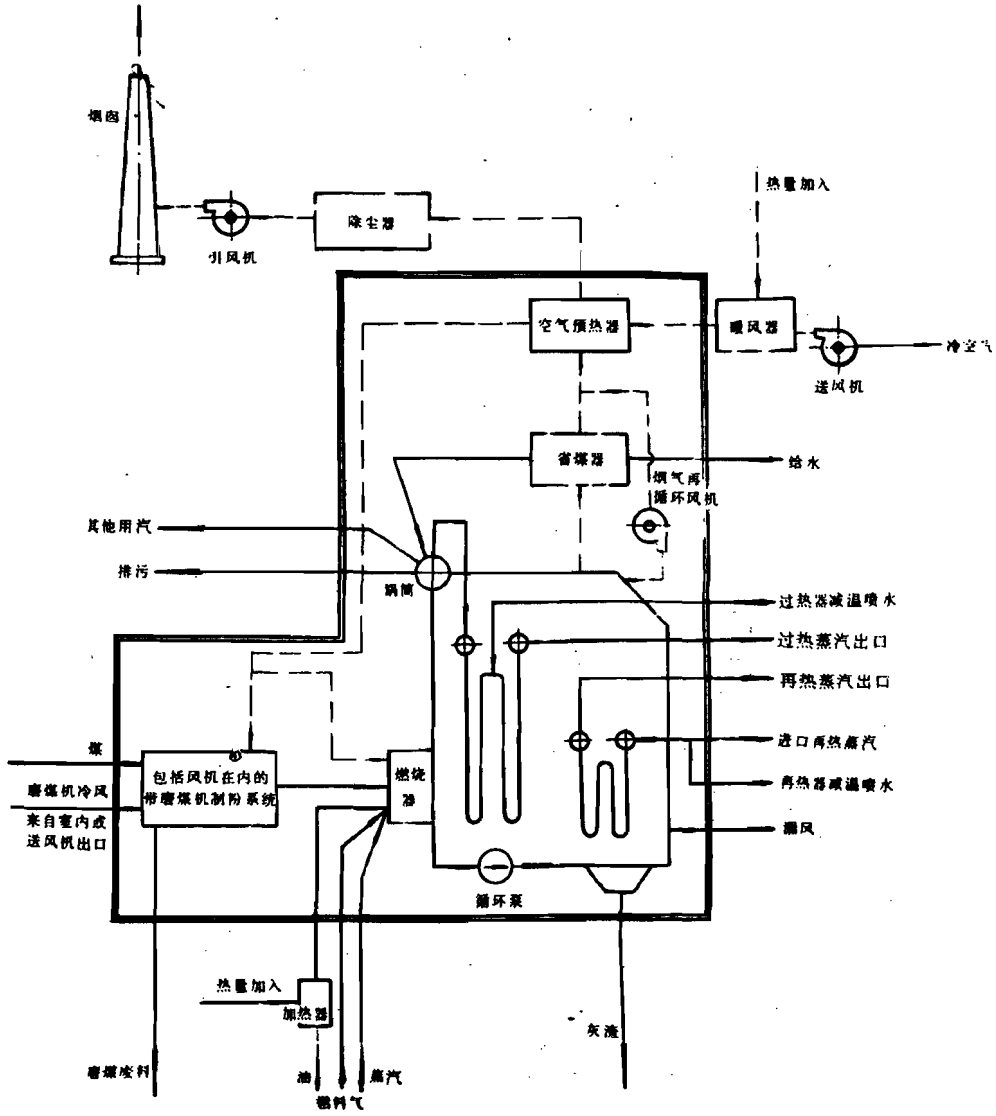


图1 锅炉机组热平衡系统界限图

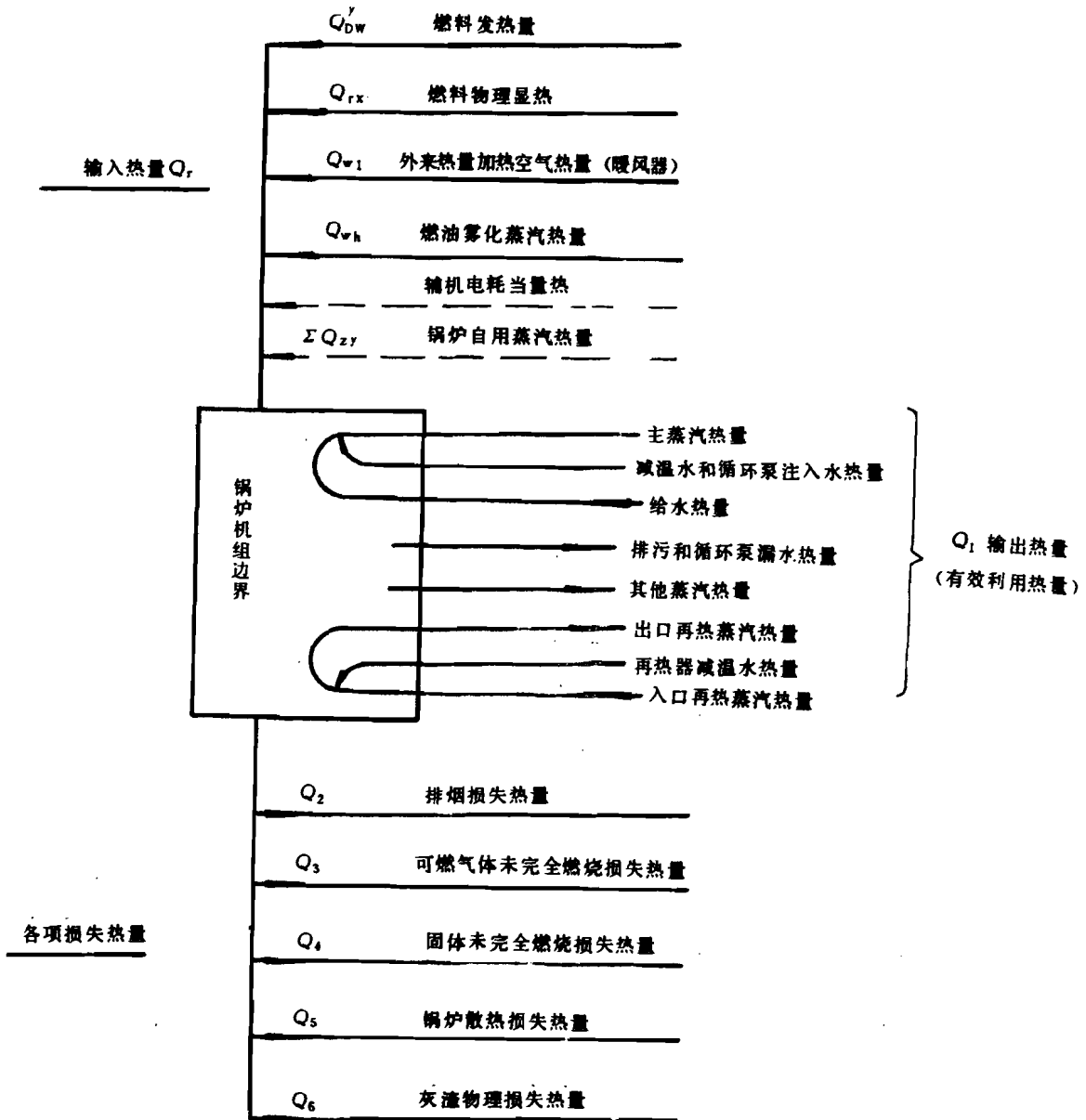


图 2 锅炉机组热量平衡

4 导则

4.1 能量平衡系统

4.1.1 本标准规定的锅炉机组系统界限见图 1,包括:带循环泵的汽水系统、带磨煤机的制粉系统、燃烧设备、以及烟气再循环风机等。不包括:暖风器、油加热器、送、引风机等设备。

4.1.2 在特殊情况下,经协商也可更改上述系统界限,但必须相应修改有关的测试计算方法。

4.1.3 规定锅炉送风机入口处空气温度为各项输入与输出能量的起算点,即基准温度。

当锅炉设有暖风器和热风再循环装置时,验收试验中应将其解列。

4.1.4 采用燃料应用基低位发热量。

4.1.5 本标准规定采用《国际单位制的水和水蒸汽性质》(水利电力出版社,1983年首版)中的蒸汽热力特性表。

4.2 应达成协议的项目

4.2.1 试验目的与内容。

4.2.2 试验单位、试验人员及职责范围。必要时,应明确发生分歧时的仲裁单位。

4.2.3 试验燃料的特性。

4.2.4 与试验有关的各项测量。

4.2.5 燃料、灰渣、烟气、汽、水等取样方法及进行有关分析的实验室。

4.2.6 试验用仪器及其技术特性和校验单位(见第 5 章)。

4.2.7 设备状态及试验期间的运行方式,包括辅助设备的投运方式。

4.2.8 效率的计算方法及误差分析原则,试验结果的允许误差及重复性工况试验之间效率的允许偏差。

4.2.9 不进行测量的给定热损失,简化热效率的测试和计算方法。

4.2.10 稳定工况的确认方法。

4.2.11 试验期间锅炉主要参量的允许波动幅度(但不得超过表 3 规定)。

4.2.12 特殊工况及异常情况的处理,试验数据的取舍。

4.2.13 换算到保证条件下的效率计算方法。

4.2.14 各个灰、渣收集点之间灰渣量的分配比例(灰渣平衡百分率)。

4.2.15 试验大纲

试验大纲由试验负责人编写,并经试验各方认可。内容包括:

- a. 试验目的;
- b. 试验条件及要求;
- c. 试验工况;
- d. 主要测点布置,测试手段;
- e. 试验数据处理原则;
- f. 试验人员及组织;
- g. 试验日程;
- h. 其他。

4.2.16 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。

4.2.17 试验原始记录的保存单位。

4.2.18 其他在本标准内的未尽事宜。

4.3 试验结果的允差

4.3.1 本标准不考虑关于性能保证值总的允差。根据试验观测值按标定结果修正及计算所得,即为试验结果。

4.3.2 若经参加各方协议,明确规定测量和取样中的允许误差或热效率测量误差时,可按本标准第 10

章进行误差分析和计算。

4.4 试验条件和试验准备

4.4.1 确认锅炉机组各主、辅机能正常运转并满足试验要求。对于验收试验,须经有关各方认可,机组经调试其运行已达满意状态。

4.4.2 整个锅炉机组的严密性检查

- a. 消除烟、风及制粉系统不应有的泄漏;
- b. 消除汽、水、燃料的泄漏;
- c. 确定试验机组系统已与其他非试验系统隔离。

4.4.3 对于验收试验,应使所有受热面在开始试验前均保持正常运行时的清洁度。

4.4.4 确定已具有足够的、符合试验规定的试验燃料。

4.4.5 对所有参与试验的仪表(器)进行校验和标定。

4.4.6 设备的实际状态、受热面的清洁度及燃料特性等和预先规定条件的任何偏离,均应记录在试验报告中。

4.4.7 测试期间不允许进行可能干扰试验工况的任何操作,如排污、吹灰、打焦等。

4.5 机组稳定时间

验收试验前,锅炉机组应连续正常运行3天以上。正式试验前的12h中,前9h机组运行负荷应不低于试验负荷的75%,后3h应维持预定的试验负荷。

4.6 参数波动范围

验收试验过程中,锅炉蒸发量及蒸汽参数波动的最大允许偏差见表3。

表 3

测 量 项 目		观测值偏离规定值的允许偏差
蒸发量 D t/h	>220	$\pm 3\%$
	$65\sim 220$	$\pm 6\%$
	<65	$\pm 10\%$
蒸汽压力 p MPa	≥ 9.5	$\pm 2\%$ ¹⁾
	<9.5	$\pm 4\%$ ¹⁾
蒸汽温度 t °C	540	+5 -10
	450	+5 -15
	400	+10 -20

注:1) 不超过最高允许工作压力。

4.7 预备性试验

正式试验前,须按正式试验的测试项目及要求进行一次预备性试验。

4.7.1 预备性试验的目的

- a. 检验测试装置和仪器;
- b. 培训试验观测人员。

4.7.2 经试验各方认可,对试验结果无异议的情况下,预备性试验也可作为正式试验的一部分。

4.8 验收试验的持续时间

测定锅炉机组热效率时的试验持续时间见表4。

表 4

h

燃 烧 方 式		测定热效率方法	工况稳定时间	试验持续时间	备 注
火室炉	固态排渣	热损失法 或 输入—输出热量法	≥ 0.5	≥ 4	—
	液态排渣 (包括旋风炉)		≥ 1	> 4	工况延长时间内由 试验各方商定
火 床 炉		热 损 失 法	大于一个炉 排行走时间	≥ 4	—
		输入—输出热量法		≥ 6	—

4.9 测量的时间间隔

测量的时间间隔见表 5。

表 5

测 量 对 象	测量或取样的时间间隔	备 注
蒸汽温度、压力、流量、排烟 温度、送风温度等主要参数	5~15 min	
其他次要参数	一般 30 min	
烟气分析	15~20 min	
积算表	试验起、止时,准确测读一次,试 验中,每小时取读数一次供参考	
煤粉取样	每个试验工况不少于 2 次	
其他物量取样(如灰渣、燃料等)	按第 5.6 条和 5.8 条的规定	或按协议

4.10 试验工况的维持

4.10.1 试验工况开始后直至结束时,锅炉燃烧工况、燃料量(包括粉仓粉位或炉排燃料层厚度)、主蒸汽流量、再热蒸汽流量、给水流量、锅筒水位(对锅筒锅炉)、中间点温度(对直流炉)、过量空气系数、配风情况、制粉系统投运方式以及所有试验需控制的温度、压力等参数,应尽可能保持一致和稳定。

4.10.2 燃用固体燃料的火床锅炉的清炉工作及燃料层的调整,应在试验开始前适当时间内结束。

4.11 试验记录

4.11.1 应按规定将所有观察情况和测量结果全部记录于试验专用表格中。

4.11.2 由于某些原因(如测量系统泄漏等)造成参考试验数据的失效,经试验负责人认可,此类数据可不记录。

4.11.3 试验数据记录至少应包括下列项目:

- a. 试验名称;
- b. 工况序列;
- c. 试验日期;
- d. 试验开始与结束时间;
- e. 测试时间与数据;
- f. 仪器类型及精度;
- g. 修正系数或修正值;
- h. 与数据处理有关的其他项目;
- i. 记录、计算人及负责人。

4.11.4 对于持续时间较长的某些工况试验,需要更换观测人员时,应保证试验开始和结束时为同一观测人员。

4.12 工况试验的舍弃

4.12.1 在试验过程中或整理试验结果时,发现观测到的数据中有严重的异常情况,则应考虑将此工况试验舍弃;如果受影响的部分是在试验的开头或结尾处,则可部分舍弃;如有必要,应重做该工况试验。

4.12.2 凡出现下列情况之一时,该工况试验应作废:

- a. 试验燃料特性超出事先规定的燃料特性变化范围;
- b. 蒸发量或蒸汽参数波动超出试验规定的范围;
- c. 某主要测量项目的试验数据中有三分之一以上出现异常或矛盾;
- d. 试验结果的误差或允差超出协议规定的数值。

4.13 热效率试验

进行验收试验时,在所要求的负荷下至少应做两次试验。若试验结果超过预先一致同意的平行试验之间的热效率允差,则需要做第三次试验。该负荷下的试验热效率为其中两次落在允差范围内的相近热效率平均值。

4.14 性能曲线

如果要求取锅炉性能曲线,至少应进行4个不同蒸发量的工况试验。

5 测试方法及测量仪表

5.1 通则

5.1.1 锅炉热效率的主要测量项目见表6。

5.1.2 经协商同意,也可采用未包含在本标准规定范围的其他仪器装置进行测量。

表 6

序号	名 称	方 法
一、	输入—输出热量法	
1	燃料量	按第 5.5 条
2	燃料发热量及工业分析	按第 5.6 条
3	燃料和空气温度	按第 5.2 条
4	过热蒸汽、再热蒸汽及其他用途蒸汽的流量、压力和温度	按第 5.2 条,第 5.3 条,第 5.4 条
5	给水和减温水流量、压力、温度	按第 5.2 条,第 5.3 条,第 5.4 条
6	暖风器进、出口风温,风量及外来热源工质流量、温度、压力	按第 5.2 条,第 5.3 条,第 5.4 条
7	泄漏与排污流量	按具体情况协商
8	锅筒内压力	按第 5.3 条
二、	热损失法	
1	燃料发热量、工业分析及元素分析	按第 5.6 条
2	烟气分析(CO ₂ 、O ₂ 、CO、H ₂ 、C _m H _n 等)	按第 5.7 条
3	烟气温度	按第 5.2 条
4	燃料及空气温度	按第 5.2 条
5	外界环境干、湿球温度,大气压力	按第 5.2 条,第 5.3 条
6	暖风器进、出口空气温度,空气量	按第 5.2 条,第 5.3 条,第 5.4 条
7	外来雾化蒸汽压力、温度、流量及其他外来热源工质流量、温度、压力	按第 5.2 条,第 5.3 条,第 5.4 条
8	各灰渣量分配比例及可燃物含量	按第 5.6 条,第 5.8 条,按附录 E (补充件)
9	灰渣温度	按第 5.2 条,第 6.3.5 条
三、	辅助设备功率消耗	按第 8 章,用标定过的功率表或电度表测定

5.1.3 仪器要求及校验规定:

5.1.3.1 锅炉验收试验中,各重要测试项目所采用仪表和测量方法的测量误差按表 7 规定。

表 7

序号	测量项目及仪器		测量误差		备注		
			输入—输出法	热损失法			
1	水	称重箱	±0.1%	—	—		
		容积箱	±0.25% (测量范围内)	—	—		
		孔板或喷嘴	±(0.35%~0.6%)	—	包括差压计 GB 2624		
		给水温度	±0.5%	—	—		
2	蒸汽	温度	±0.5%	—	—		
		压力表	±(0.4%~1.0%)	—	GB 1227		
		孔板或喷嘴 (主蒸汽流量)	±(0.35%~0.6%) (测量范围内)	—	包括差压计 GB 2624		
		再热蒸汽流量	±0.6%	—	按热平衡计算		
3	燃料	燃料量	±(0.1%~0.5%)	—	—		
		工业分析	水分	—	±(0.2%~0.4%)	GB 212	
			灰分	—	±(0.2%~0.5%)	GB 212	
		热值	煤	±(0.5%~1.0%)	±(0.5%~1.0%)	GB 213	
			油、气	±(0.35%~1.0%)	±(0.35%~1.0%)	GB 384	
		元素分析	碳	煤	±0.5%	±0.5%	GB 476
				油	±0.6%	±0.6%	RS-32-1
			氢	煤	±0.15%	±0.15%	GB 476
油	±0.30%			±0.30%	RS-32-1		
4	烟气和空气	烟气和空气温度	—	±0.5%	—		
		奥氏分析仪、色谱仪	—	±3%	—		

注：除烟气成分分析外，均不包含取样误差。

5.1.3.2 试验前，所有主要的一次元件及仪表(包括控制表盘上的仪表)须按规定进行校验和标定。主要参量的监测仪表应具备法定计量部门出具的校验合格证(或校验印记)。该计量部门应具有与试验规格相适应的水平。

5.1.3.3 经协商或经试验负责人决定，验收试验中主要参量的测量仪器应在试验后进行复校，如发现异常则应舍弃所测数据。

5.2 温度测定

5.2.1 一般说明

5.2.1.1 温度测量所用温度计见表 8。

5.2.1.2 经协商也可采用其他未列入的温度测量仪表，但主要项目，即蒸汽温度、给水温度、空气温度、排烟温度，仍应采用表 8 中所列的仪表。

5.2.1.3 温度计测点应选择(在)管(烟)道或通道横截面上速度与温度分布均匀的部位。对于大尺寸管(烟)道以及验收试验中的热效率测定，必须采用多点测量。多点测量网格法等截面划分原则及代表点的确定见附录 H(补充件)。

5.2.1.4 应采取必要措施，防止温度测量仪表因传导、对流和辐射引起过大的误差。

5.2.1.5 温度计套管以及温度计在管(烟)道上的安装见附录 N(补充件)。

5.2.2 蒸汽温度

5.2.2.1 测定过热蒸汽和再热蒸汽温度时,应同时采用插入式套管。

5.2.2.2 饱和蒸汽温度可在蒸汽管路任何方便的位置上测量(但尽可能靠近饱和蒸汽出口),或根据饱和蒸汽压力由水蒸汽表查得。

5.2.2.3 过热蒸汽和再热蒸汽温度测点应最大限度地接近过热器和再热器出口,且应远离束状流(如喷水减温器后)一定距离。

5.2.2.4 当蒸汽温度成为重要测试项目时,应满足下列条件:

a. 用热电偶测量时,须对热电偶和二次仪表进行校验并用冰瓶做冷端补偿;

b. 只要条件许可,应分别从两个尽可能互相靠近的测点进行测量,测量结果为两点修正测值的平均值,该两个修正后的读数偏差应不超过 $\pm 0.25\%$,否则检查原因并排除;

c. 测温处保温层应完整无损。

表 8

名 称	测 量 对 象	测 温 范 围	备 注
实验用玻璃水银温度计	小容量电站锅炉中蒸汽、给水及烟温	0~500℃	JB 1064 JB 1067 附录 N 中表 N1
热电偶温度计	水及蒸汽、燃油、燃气、空气、烟气等	200~1800℃	附录 N 中表 N1 为保证蒸汽、给水温度测量的准确性,宜用冰瓶为基准点
热电阻温度计	水及蒸汽、燃油、燃气、空气、烟气等,常用于运行控制仪表和固定监测点	-50~+500℃	附录 N 中表 N3
干、湿球温度计	空 气	大气温度	用于测量空气相对湿度

5.2.3 烟气温度

5.2.3.1 根据试验目的,温度测点可布置在炉膛出口及相应受热面的进、出口。对于热效率试验,排烟温度测点应尽可能靠近末级受热面出口处,且满足第 5.2.1.3 条的规定。

5.2.3.2 炉膛出口烟气温度,一般采用抽气热电偶测量。

5.2.3.3 排烟温度测点应与烟气取样点位置尽可能一致。

5.2.3.4 下列情况应采用网格法布置测点:

a. 验收试验时排烟温度的测量;

b. 初步测量发现测量截面处烟气流速有严重偏差;

c. 截面内不同瞬间烟气温度差别较大。

5.2.3.5 用网格法测量的平均温度,一般取各测点读数的加权平均值。当测量截面速度场较均匀时,可取烟气温度的算术平均值。

5.2.4 空气温度

5.2.4.1 基准温度的测量应避免其他热源对测温元件的辐射影响。

5.2.4.2 干、湿球温度计应置于专用的百页箱内。

5.2.4.3 热风温度的测量参照第 5.2.3 条的有关规定。

5.2.5 给水温度

给水温度应尽可能在靠近省煤器进口处且在减温器回水管前处测量。当给水温度成为主要测试项目时,应参照第 5.2.2.5 条的规定,但其中两个修正后的读数偏差应不超过 $\pm 0.5\%$ 。

5.2.6 燃料温度

采用带保护套管的热电偶温度计进行测量。

5.3 压力测量

5.3.1 一般说明

5.3.1.1 锅炉试验中,通常采用单圈弹簧管压力表、液柱式压力计和倾斜管式微压计测量工质的压力和负压。在精度符合试验要求的前提下,也可采用各种压力变送器(如膜式压力计、波纹管压力计及电接点压力计等)。压力测量仪表见表9。

表 9

压力计名称		测量对象	测量范围 MPa	型式及安装	技术规范	备 注
一般压力表		蒸汽、水	0~40	表盘或就地安装	GB 1226	使用环境温度: -40~+60℃
精密压力表					GB 1227	使用环境温度: 10~30℃
静重式压力计					—	—
液柱式 压力计	U型管压力计	烟风系统压力、压差	-0.1~+0.1	控制盘或就地安装	—	可作校验流量计的 标准压差计
	单管压力计		-0.2~+0.2		—	—
	倾斜管式微压计		-0.002~ +0.002		—	—
动槽式大气压力计 (水银压力计)		大气压力	-0.1~+0.1	—	—	—
膜式压力计 (膜盒式、膜片式)		大气压力及对膜 片不起作用的气 体微压和负压	0~0.04	控制盘或就地安装	JB 470	压力变送
波纹管压力计		烟风系统压力、 压差、负压	—	控制盘或就地安装	JB 1033	灵敏度较高,能直 接指示和记录
电接点压力计					-0.2~+0.2	JB 1608

5.3.1.2 压力计的最小分度应满足试验要求精度和对压力波动观察的要求(见第4.6条)。

5.3.1.3 弹簧管压力表环境温度与传压管液柱对表针读数的修正,以及液柱式压力计常用封液和使用的注意事项,见附录J(补充件)。

5.3.2 汽水系统压力

5.3.2.1 当汽、水压力成为重要测试项目时,应选用0.4~1.0级精度压力计,并对表针的读数进行必要的修正。

5.3.2.2 一般压力表(GB 1226)最大量程的选择应使经常指示的压力范围处于全刻度范围的1/2~3/4区段内(下限适用压力波动大的情况;上限适用恒压或压力变化范围小的情况)。

5.3.2.3 压力表计及传压管应装设在不受高温、冰冻和振动干扰的部位,压力表计接头应严密并接有虹吸管或相当于虹吸管的装置。

5.3.2.4 当被测工质压力存在脉动情况时,推荐在传压管路上装设作缓冲用的空腔容器。当瞬间压力脉动的最大值和最小值不超过平均值的2%时,装设空腔容器是行之有效的办法。

5.3.3 烟风道静压

5.3.3.1 通常在烟、风道壁面上直接开孔测量静压。在重要场合,可采用静压测量管之类的专门装置。

当直接开孔时,应满足下列要求:

- a. 尽可能在内表面平整的壁面上垂直开孔,孔径宜为 2~3mm,孔边缘不应有毛刺和倒角;
- b. 静压测孔应开在烟(风)道直段上,附近不应存在挡板、弯头等阻力部件及涡流区。

5.3.3.2 当测量含尘气流静压时,应采取适当措施严防测压孔堵塞(如测压孔避免从水平管道下部引出和在传压管上采用宝塔型扩容装置)。

5.3.3.3 当被测烟风道截面直径超过 600mm 时,同一测量截面上至少应有 4 个测压孔。

5.4 流量测定

5.4.1 一般说明

5.4.1.1 锅炉试验进行流量测定的仪器装置见表 10。

表 10

名 称		测量对象	校验或标定要求	备 注
称 重 法	称 重 箱	水	标定磅秤达到表 7 规定	—
容 积 法	容 积 箱		—	—
节 流 法	孔板或喷嘴	水和蒸汽	标定达到表 7 规定	如制造和安装经检验均符合 GB 2624 的全部技术要求,则不需标定
标准动压测定管(皮托管)		空气或含尘浓度不大的气流	可不标定	—
笛形管、文丘利、机翼形测量装置			逐根标定	—
吸气式动压测定管		含尘浓度高的气流	逐根标定	—
遮板式动压测定管				使用中应经常对结构状况进行检查并定期标定
靠背式动压测定管				

5.4.1.2 有关流量测定元件(孔板和喷嘴)的设计、制造、标定和使用,包括它们在管路中的位置和安装方法应遵循 GB 2624 中的规定。测量装置中差压传送管路的布设按附录 I(补充件)。

5.4.1.3 当流量成为重要测量项目时,应采用直接读数的系统测定差压。

5.4.1.4 采用节流装置测定水或蒸汽流量时,应在管道中一次元件的上游测量流体的温度,并在差压计上或高压侧传压管上装设压力表以确定流体密度。

5.4.1.5 测定流量时所需进行的温度、压力和压差测定,详见本标准第 5.2 条和 5.3 条的规定。

5.4.2 蒸汽流量

5.4.2.1 在用热损失法计算锅炉热效率时,为确定蒸发量或其他有关运行特性时所对应的试验机组蒸发量,可按第 5.4.3.1 条对给水流量进行测定,或者以锅炉出口装设的孔板或喷嘴测定主蒸汽流量为基础。

5.4.2.2 在用输入—输出热量法计算锅炉热效率时,应以对锅炉给水量测定结果(详见第 5.4.3.1 条)作为主蒸汽流量的基本数值,对测量点之后至汽轮机高压缸之前的任何补充或抽取的流量(如连续排污、减温用水、锅炉循环泵的注水等)进行修正。试验期间,还应对在上述区段内可能蓄水(或泄漏)的地点对蓄水量(或泄漏量)进行测量和记录,并在修正时记入。

5.4.2.3 如用二次仪表(不采用直接读差压计数值的方法)测定蒸汽流量时,如仪表本身无密度修正功能,则应按式(3)进行蒸汽密度修正:

$$q_{\text{mea}} = q_{\text{mea}}^2 \sqrt{\frac{\rho_{\text{sa}}}{\rho_{\text{sa}}}} \dots \dots \dots (3)$$

式中： $q_{\text{修正}}$ 、 $q_{\text{指示}}$ ——分别为修正后的和仪表指示的蒸汽质量流量，kg/h；
 $\rho_{\text{测}}$ 、 $\rho_{\text{计}}$ ——分别为测量状态和设计计算状态下的蒸汽密度，kg/m³。

5.4.2.4 采用热平衡法测定再热器进口蒸汽流量 $D_{\text{再}}$ 时，按式(4)确定：

$$D_{\text{再}} = D_{\text{主}} - \sum D_1 \quad \dots\dots\dots(4)$$

式中： $D_{\text{再}}$ ——再热器进口蒸汽流量，t/h；
 $D_{\text{主}}$ ——主蒸汽流量，t/h；
 $\sum D_1$ ——高压缸各级抽气流量之和，t/h。

$$D_1 = \frac{(D_w)_i [(h'_i)_i - (h_i)_i]}{(h'_i)_i - (h_i)_i} \quad \dots\dots\dots(5)$$

式中： D_1 ——某级抽气加热器进口蒸汽流量，t/h；
 $(D_w)_i$ ——某级抽气加热器水流量，t/h；
 $(h'_i)_i$ 、 $(h_i)_i$ ——某级抽气加热器进、出口蒸汽焓，kJ/kg；
 $(h'_w)_i$ 、 $(h_w)_i$ ——某级抽气加热器进、口水焓，kJ/kg。

为确定各级加热器蒸汽流量，应测定各级加热器中的进口蒸汽压力、温度和水流量以及进、口水温、压力，以确定相应各点的焓值。

5.4.2.5 当锅炉验收试验与汽轮机验收试验同时进行，可直接采用汽轮机试验中所得的再热器进口蒸汽流量作为锅炉试验确定值。

5.4.2.6 再热器出口蒸汽流量为再热器进口蒸汽流量与再热器喷水量之和。

5.4.3 给水和喷水流量

5.4.3.1 当采用输入—输出热量法测定锅炉热效率及测定锅炉蒸发量时，采用孔板或喷嘴测定给水和喷水流量。对它们的校验或标定要求按表7的规定。

5.4.3.2 如存在由往复装置或其他脉动源引起的流量波动，应通过在脉动源和一次测量元件之间加装缓冲容器、阻尼管，或用其他吸收压力脉动的方法，使流量指示的最大和最小波动值之差不超过平均流量的±5%。

5.4.3.3 在第5.4.3.1条情况下测定时，一次测量元件处的差压应用两套差压计装置测量，测量结果应达到相互一致，允差±2%。

5.4.3.4 在测量给水流量的节流元件中，水的最低压力必须比水温实测值所对应的饱和压力高0.25MPa，或水的实测温度必须比测量的最低压力所对应的饱和温度低15℃，以防给水在节流件中汽化。

5.4.4 烟气及空气流量

5.4.4.1 采用烟风道动压求得烟风流速的方法确定烟气及空气流量。

5.4.4.2 推荐采用的动压测定管见表10。代表点的确定见附录H(补充件)。

5.4.4.3 应同时测定大气压力及管道内气流的静压和温度。对于烟气，还需在测量的同时分析烟气成分中的氧气(O₂)及三原子气体(RO₂)等含量，以计算烟气密度。

5.4.4.4 气体流量按式(6)、式(7)计算：

$$V = 3600W_{\text{静}}A \quad \dots\dots\dots(6)$$

$$V_{\text{实}} = 3600W_{\text{静}}A \frac{\rho}{\rho_{\text{标}}} \quad \dots\dots\dots(7)$$

式中: V, V_n ——分别为气流的实测和换算至标准状态下的流量, m^3/h ;
 A ——被测管道截面积, m^2 ;
 W_{pj} ——气流在被测截面的平均流速, m/s 。按式(8)计算并按附录 H 求取:

$$W_{pj} = K_d \sqrt{\frac{2\Delta p_d}{\rho}} \dots\dots\dots(8)$$

式中: Δp_d ——动压测定管实测压差, Pa ;
 K_d ——修正系数;
 ρ, ρ_n ——气流的实测和标准状态下的密度, kg/m^3 。
 对空气: $\rho_n = 1.293kg/m^3$;

$$\rho = 3.483 \left(\frac{p_{at} + H_s}{273 - t} \right) \times 10^{-3} \dots\dots\dots(9)$$

式中: p_{at} ——就地实测大气压, Pa ;
 H_s ——管道内气流静压, Pa ;
 对烟气: $\rho = 0.01428 O_2 + 0.01964 CO_2 + 0.0082 H_2O + 0.02858 SO_2 + 0.0127 N_2 \dots\dots\dots(10)$

式中: $O_2, CO_2, H_2O, SO_2, N_2$ ——烟气中相应各气体成分的体积含量百分率, %。
 其中: $O_2 + CO_2 + H_2O + SO_2 + N_2 = 100\%$ 。

5.4.4.5 测孔管座应与管道壁面垂直;测量时测定管动压孔应正对气流。

5.4.4.6 靠背式测定管及笛形测定管对测量截面、后直管段的推荐值见表 11。

表 11

名 称	靠背式测定管	笛 形 管
测量截面(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。

5.5 燃料量测定

5.5.1 一般说明

5.5.1.1 燃料量测量及测量时间间隔按表 12。

5.5.1.2 燃料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的燃料收集、称量和记录,以对燃料量进行修正。

5.5.2 固体燃料

5.5.2.1 固体燃料应在靠近使用地点称量。对煤粉锅炉,应尽量在燃料磨制之前,以避免由于燃料水分蒸发等原因而产生的偏差。

表 12

仪(衡)器	校验或 标定要求	测量时间间隔			备 注		
		固体燃料	液体燃料	气体燃料			
自动磅秤、且带有直接质量指示值	标 定 达 到 表 7 的 要 求	10~15	—	—	—		
其他衡器		称量时记录					
称重箱		每个工况至少两次记取读数,即开始时和结束时各一次。必要时增加记录读数的次数					
容积箱							
节流式流量计(孔板、喷嘴)		—				10~15	如制造、安装经检验均符合 GB 2624 的全部技术要求则不需标定
容积式流量计		—	10~15				

5.5.3 液体燃料

5.5.3.1 凡采用燃烧器回油系统的场合,应同时测量供油和回油的流量。

5.5.3.2 用容积法计量时,应同时按第 5.2 条测定燃料温度,并对由于温度变化而产生的密度变化进行修正。

5.5.4 气体燃料

5.5.4.1 测量时,应同时按第 5.3 和 5.2 条测定气体燃料的压力、温度,并将流量计的读数换算成标准状况下的容积。

5.5.4.2 节流式流量计的安装位置、一次元件与差压计之间连接管路系统的装设,按 GB 2624 的规定。

5.6 燃料采样及分析

5.6.1 燃料采样

5.6.1.1 应从运动中的原煤流中取样。

5.6.1.2 采样应在整个试验工况期间按下述规定进行:

a. 固体燃料采样有效时间应与锅炉试验工况时间相等,但采样开始和结束的时间应视燃料从采取点至送入炉膛所需的时间而适当提前。整个采样期间应每隔时间采取样品;

b. 气体燃料在整个试验过程中应连续或均隔时间采样。为使采集的样品具有代表性,试验前应先行采样,按本标准附录 H 的规定确定取样代表点。

5.6.1.3 入炉原煤取样铲长×宽×高为 300mm×200mm×50mm。不同煤种获得一个煤样需采取的份样个数、粒度及质量按表 13。

表 13

煤 类	粒 度 mm	份 样 质 量 kg	份 样 个 数 (个)
烟 煤	≤70	≥1	≥10
褐 煤	≤70	≥1	≥15
无 烟 煤	≤70	≥1	≥20
混 煤	≤70	≥1	≥50

a. 当燃料为单一煤种时,将所采取的全部份样煤按 RS-3-1 的规定充分混合后缩制成一个煤样;

b. 当燃料为混煤时,按第 5.6.1.3a 规定将全部份样缩制成多个平行煤样(一般不少于 5 个);

c. 采集的煤样应立即密封保存;缩制煤样应尽快进行,缩制后应密封保存。

- 5.6.1.4 其他未尽事项按 RS-1-1 的规定。
- 5.6.1.5 液体燃料采样按 RS-28-1 的规定。
- 5.6.1.6 气体燃料采样地点应在燃料的最高压力和温度区段内尽可能靠近锅炉处的自然扰流装置(如孔板、阀门挡板等)之后的垂直管道上,采样前应对采样管路进行排放冲洗。
- 5.6.1.7 气体燃料的总取样量应不少于 20L。所收集的样品,在集气瓶中充分混合后同时装入三只容积为 500cm³ 的玻璃吸量瓶内,其中一瓶为备用。

5.6.2 燃料分析

5.6.2.1 锅炉验收试验中的燃料分析方法如下:

a. 固体燃料按下列标准进行:

GB 211, GB 212, GB 213, GB 214, GB 218, GB 219, GB 474, GB 476, GB 483, GB 2565,

b. 液体燃料按下列标准进行:

GB 260, GB 261, GB 265, GB 266, GB 267, GB 268, GB 380, GB 384, GB 388, GB 508, GB 510, GB 1884, GB 2538, GB 2540;

c. 气体燃料分析采用色谱仪;

d. 也可采用《火力发电厂燃料试验方法》(水电部颁发, 1984 年版)。

5.6.2.2 当固体燃料为混煤时,应对多个平行样品分别化验,对化验结果进行误差分析,舍弃不合理值后取算术平均值为最终分析结果。

5.7 烟气取样与分析

5.7.1 取样位置

锅炉试验烟气分析测定成分和取样位置见表 14。

表 14

试验目的	测定成分	取样位置
热效率测定、 过量空气系数及漏风测定	O ₂ , CO ₂ , CO, CH ₄ , C ₂ H ₆ , H ₂	炉膛、锅炉各级受热面出口
污染物测定	NO _x , SO ₂ , CO, C ₂ H ₆ , H ₂ S	烟道或烟囱
炉膛水冷壁腐蚀	CO, H ₂ S, O ₂	炉膛腐蚀壁面附近
低温腐蚀	SO ₃	空气预热器进、出口

5.7.2 取样点

烟气分析取样点布置应使取出样品具有代表性,规定如下:

5.7.2.1 锅炉验收试验应采用网格法或多代表点测量法。当采用多代表点测量时,取样点总数应不少于 4 点。

5.7.2.2 正式试验前预先测定各点烟气中氧量及烟气速度。若氧量与速度分布中有一项较均匀时,可采用多代表点取样,否则采用网格法取样。

5.7.2.3 网格法等截面划分的原则及代表点的确定按附录 H。

5.7.2.4 用多点取样或网格法取出的各点样品,在不影响精度的前提下可用混合装置将样品混合为 1~2 个样品进行分析¹⁾。推荐的烟气多点取样混合器见附录 O(补充件)。

注:1) 当测定成分为二氧化硫、硫化氢等易溶于饱和食盐水的气体成分时,不宜采用多点取样混合器。

5.7.3 取样管路的设计和材料的选用

5.7.3.1 管路材料应保证在工作温度下不与样品起反应,必要时,管路引出炉墙后应保温或加热。推荐的取样管路采用材料见表 15。

表 15

气 体	取 样 处 烟 气 温 度			软管材料
	<400℃	400~570℃	>570℃	
O ₂	碳 钢	不 锈 钢	不锈钢(冷却至 650℃以下)	氟树脂或氟橡胶
CO	碳 钢	不锈钢(冷却至 480℃以下)	不锈钢(冷却至 480℃以下)	氟树脂或氟橡胶 氯乙烯橡胶
CO ₂	碳 钢	不 锈 钢	不锈钢(冷却至 650℃以下)	氟树脂或氟橡胶
NO	不锈钢或玻璃	不锈钢或玻璃	不锈钢或石英(冷却至 480℃以下)	
NO ₂ ¹⁾	不锈钢或玻璃 ²⁾ (保持在 180℃)	不锈钢或玻璃 ²⁾ (保持在 180℃)	不锈钢或石英(保持在 180℃)	
SO ₂ ¹⁾	不锈钢或玻璃 ²⁾ (保持在 180℃以上)	不锈钢或玻璃 ²⁾ (保持在 180~190℃)	不锈钢或石英(保持在 180~400℃)	氟树脂或氟橡胶 氯乙烯橡胶
SO ₃ ¹⁾	不锈钢或玻璃 ²⁾ (保持在 180℃以上)	不锈钢或玻璃 ²⁾ (保持在 180~190℃)	不锈钢或石英(保持在 180~400℃)	
H ₂ S ¹⁾	碳钢(保持在 180~400℃)	不锈钢(保持在 180~570℃)	不锈钢(保持在 180~650℃)	
C _m H _n ¹⁾	碳钢(保持在 190℃)	不锈钢(保持在 190℃)	不锈钢(保持在 190℃)	氟树脂或氟橡胶

注: 1) 如果取样管路不能满足此要求时, 应将样品预先干燥;

2) 石英玻璃只能用于温度低于 290℃时。

5.7.3.2 采用高温试样时, 必须配用合适的取样冷却器。

5.7.3.3 取样管路应尽可能短而直, 并便于清理和吹扫。

5.7.3.4 取样管应顺烟气流动方向倾斜并装有适当的疏水管, 整个取样管路须严密不漏。

5.7.3.5 在取样管路中应设置必要的粉尘过滤装置。

5.7.4 分析方法和注意事项

5.7.4.1 对烟气中各被测成分的分析方法以及所采用的设备、仪器及仪器的精度等有关规定见表 16。

5.7.4.2 对于用热损失法测定锅炉热效率的锅炉验收试验, 以及对锅炉某一部件或部分部件进行运行特性方面的性能验收试验, 对烟气中的氧气(O₂)、三原子气体(RO₂, 即 SO₂+CO₂)含量的测定应采用奥氏分析仪。

5.7.4.3 注意事项

a. 分析时应防止烟气分析仪器泄漏, 保持管路中无试剂, 避免试剂的污染与漏出;

b. 避免分析过程中的样品温度变化;

c. 进行烟气成分分析时, 应连续取样。

5.8 灰渣取样与分析

5.8.1 一般说明

5.8.1.1 本节内所指灰渣, 系指炉渣和飞灰。其中火床炉的炉渣也包括漏煤, 随烟气进入烟道的燃料灰分统称飞灰, 而在除尘器前烟道集灰斗内收集的飞灰称之为沉降灰。

5.8.1.2 有条件时, 应精确称量从机组排出的全部灰渣量, 否则可按容积法或灰、渣平衡法来估计任何待定灰渣量, 或按协议规定的灰渣比例进行计算。

5.8.1.3 对设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平衡比率。

5.8.2 炉渣的收集、称量与采样

5.8.2.1 对火床炉, 收集炉渣开始和结束的时间应考虑炉渣行程所需要的滞后时间。

5.8.2.2 采用经标定合格的磅秤进行称量,同时将采样送实验室分析测定其含碳量。

5.8.2.3 采样量按下列规定:

- a. 火床炉:为试验期间总炉渣量的 1/20,且不少于 100kg;
- b. 火室炉:总采样量可视炉膛结构、排渣方式而定,但一般不应少于 2kg。

5.8.2.4 采样应在整个试验期间连续或等时间间隔进行,以保证样品的代表性。取样时间可视具体方法而定,但采样次数应不少于 10 次。

5.8.2.5 炉渣采样视炉底结构和排渣装置不同可从渣流中连续接取,或定期从渣槽(池、斗)内掏取,但此时应特别注意保证样品具有代表性,每次取样量应相同。

5.8.2.6 全部样品被破碎到粒度小于 25mm,充分混合后,按四分法(GB 474)缩制成两份各 7.5kg 的样品,如样品不足 15kg,则将全部样品破碎至 3mm 以下,充分混合,制成两份各 0.5kg 的样品。试样的制备按《火力发电厂燃料试验方法》(1984 年版)中 RS-3-1。

5.8.2.7 缩制后的两份样品,一份送实验室供分析,另一份保留直至所有试验结果经审查被认可为止。当需要进行灰平衡时,应在称量同时进行取样,注意防止样品水分散失。称量结束后尽快缩制及分析。

5.8.3 漏煤的收集、称量与采样

火床炉应收集试验期间全部漏煤并称量。称量和采样按第 5.8.2 条中的有关规定,采取样品数量应不少于 2kg,破碎至粒度小于 3mm,充分混合后制成两份各 1kg 的样品。

5.8.4 沉降灰的收集与采样

5.8.4.1 必须采集飞灰取样位置之前的沉降灰斗的灰样。

5.8.4.2 整个试验期间可用数个固定式取样器由集灰斗或落灰管中连续收集沉降灰。常用沉降灰收集器见附录 O(补充件)。

5.8.5 飞灰采样

5.8.5.1 飞灰采样的位置一般在尾部烟道中的合适部位,尽可能在垂直烟道气流稳定处,且采样截面前、后应有适当直段。如有可能,应设在省煤器出口的烟道上。

5.8.5.2 采样应具有代表性。

- a. 对锅炉验收试验,用网格法(见附录 H)进行多点等速采样;
- b. 其他试验:可在试验前通过初步测量来确定采样点数、采样代表点及其位置(见附录 H)。

5.8.5.3 飞灰采样代表点应满足下列规定:

- a. 烟道宽度为 4~10m 时,应在左、右两侧布置 2 个测点;
- b. 烟道宽度超过 10m 时,应均匀布置 3~4 个测点;
- c. 分割烟道,在每个烟道内均应按 a、b 规定布置测点。

5.8.5.4 对于锅炉验收试验,应在整个试验期间逐点取样,且每个工况下应至少按网格顺序循环采样两遍,以获得不少于两个平行的飞灰样品。对于一般性试验,若采用固定式取样装置,应在整个试验期间连续取样。

5.8.5.5 采样装置

验收试验应采用飞灰等速取样装置;一般试验,可采用经标定的旋风子式飞灰采样器。取样前,应消除取样管及装置内的存灰。

5.8.5.6 取样系统应保持良好密封,暴露在烟道外的取样管道及飞灰收集器应采取保温或加热手段以防水分凝结。

5.8.6 灰渣分析

5.8.6.1 灰渣含湿量分析参照 RS-4-2 的规定。

5.8.6.2 灰渣可燃物含量测定按 RS-26-1 的规定。

5.8.6.3 灰渣发热量可用氧弹测得,也可用灼烧法或测定灰渣中碳、氢含量计算获得。

表

烟气成分	测量方法所适宜的浓度		对取样系统的要求	可以采用的
	仪器分析	手工分析		仪器分析
O ₂	0%~21%	0%~21%	—	顺磁氧量计 氧化锆氧量计
CO ₂	0%~21%	0%~21%	—	二氧化碳分析仪 不分光红外吸收仪(2mg/m ³ 以上) 气相色谱仪
CO	微量含量	≥0.2%	应避免取样器达到起氧化CO的催化作用温度	气相色谱仪 一氧化碳红外分析仪(不分光)(2mg/m ³ 以上) 红外分光光度计(1mg/m ³ 以上)
N ₂	任何浓度		—	—
SO ₂	任何浓度	2~5700 mg/m ³	连续加热以避免烟气中水蒸气凝结,对取样系统标定时应排除水分和O ₂	非扩散红外线吸收(0~2860mg/m ³) 电化膜扩散(0~14300mg/m ³) 电解滴定 化学荧光(0.2~35700mg/m ³) 紫外线脉冲荧光(≥3mg/m ³)
NO ₂	NO 0~20500 mg/m ³	20~2000 mg/m ³	清除水分而不损失NO ₂ ,应采用干燥器	化学发光(0.1~13390mg/m ³) (0.1~205400mg/m ³) 氮氧化物分析仪(0~8mg/m ³) 电化膜扩散(0~6695mg/m ³)
		NO ₂ 5~500 mg/m ³	—	非扩散紫外线吸收(0~4100mg/m ³)
H ₂ S	0~7590 mg/m ³	3~1500 mg/m ³	—	电解滴定 电化膜扩散(0~7590mg/m ³) 火焰光度气相色谱仪(0~150mg/m ³) 非扩散红外线吸收
H ₂	—	>0.02% (体积)	—	色 谱 仪
CH ₄	—		—	色 谱 仪

测量方法及其准确度			备 注
准 确 度	手 工 分 析	准 确 度	
±(2%~5%) ±(1.5%~3%)	奥氏仪	±(1.5%~3.0%)	当采用仪器分析时,应在试验开始前及试验过程中定时用奥氏仪进行校验 大多数电厂的湿式除尘器碱性液体极易吸收CO ₂
±(0.5%~3%) ±3%	奥氏仪	(包括测量系统误差)	
±3% ±0.5%	烟气全分析仪 检气管(20~1000mg/m ³)	±0.02% (体积)	对估计含CO较高的气体,采用色谱仪等仪器进行分析测定。 检气管法见《污染源统一监测分析方法》(1982年)
—	—	—	采用先测得有关各种气体含量后计算而得N ₂ 含量
1%~2.0% ±2.0% ±0.5%	碘量法(140~5700mg/m ³) 盐酸付玫瑰苯胺比色法(2~150mg/m ³)	—	习惯用火焰测光法测定烟气中硫化物总量,并配以气相色谱仪区分它们。 两种手工分析法见《污染源统一监测分析方法》(1982年)
±0.5% ±2.0% ±1.0% ±1.0%	二磺酸酚法(快速法) (适用浓度 20~2000mg/m ³) 盐酸萘乙胺比色法 (5~500mg/m ³)	— —	手工分析方法见《污染源统一监测分析方法》
5mm] ±1% ±2% ±(1%~2%)	碘量法(3~120mg/m ³) 亚甲基兰比色法 (10~1500mg/m ³)	—	
—	烟气全分析仪	±0.02% (体积)	
—	—	—	燃煤锅炉中无须测量

6 热效率计算

6.1 一般说明

6.1.1 锅炉热效率计算以锅炉设备的输入热量与输出热量及各项热损失的能量平衡为基础。本计算方法仅适用于第 4.1.1 条所规定的能量平衡系统界限。

6.1.2 对于固体和液体燃料,以每千克燃料量为基础进行计算;对于气体燃料,以每标准立方米燃料量为基础计算。

6.1.3 采用应用基燃料成分进行计算。

6.1.3.1 固体燃料

按本标准第 5.6 条规定进行煤的成分分析,燃料基质换算系数见表 17。

表 17

已知燃料基质	欲 求 燃 料 基 质			
	应 用 基	分 析 基	干 燥 基	可 燃 基
应 用 基	1	$\frac{100 - W^y}{100 - W^t}$	$\frac{100}{100 - W^y}$	$\frac{100}{100 - W^y - A^t}$
分 析 基	$\frac{100 - W^y}{100 - W^t}$	1	$\frac{100}{100 - W^t}$	$\frac{100}{100 - W^t - A^t}$
干 燥 基	$\frac{100 - W^y}{100}$	$\frac{100 - W^t}{100}$	1	$\frac{100}{100 - A^t}$
可 燃 基	$\frac{100 - W^y - A^t}{100}$	$\frac{100 - W^t - A^t}{100}$	$\frac{100 - A^t}{100}$	1

燃料发热量的换算公式如式(11):

$$\begin{aligned}
 Q_{bw} &= Q_{bw}^y \times \frac{100 - W^y}{100 - W^t} - 25.12(9H^y + W^y) \\
 &= Q_{bw}^y - 25.12(9H^y + W^y) \\
 &= (Q_{bw}^y + 25.12W^t) \frac{100 - W^y}{100 - W^t} - 25.12W^y \quad \dots\dots\dots(11)
 \end{aligned}$$

6.1.3.2 液体燃料

液体燃料基质换算同第 6.1.3.1 条。

6.1.3.3 气体燃料

气体燃料的成分按本标准第 4.6 条规定测定。气体燃料低位发热量按式(12)计算:

$$Q_{bw,q} = 107.98H_2 + 126.36CO + \sum(Q_i C_i H_i)_i \quad \dots\dots\dots(12)$$

式中: $Q_{bw,q}$ —— 气体燃料低位发热量, kJ/m^3 ;

H_2 、 CO 、 $C_i H_i$ —— 气体燃料中相应各可燃气体成分的体积含量百分率, %;

Q_i —— 碳氢化合物低位发热量, kJ/m^3 。

见附录 C(补充件)表 C2。

6.1.3.4 混合燃料

对燃用多种燃料的锅炉,应分别测定各种燃料消耗量及其元素分析值、工业分析值和低位发热量。锅炉效率计算按各种燃料占总燃料消耗量份额的加权平均值为基础进行计算,例如:

$$Q_{\%w} = \frac{\sum_{i=1}^n (B_i(Q_{\%w})_i)}{\sum_{i=1}^n B_i} = \sum_{i=1}^n b_i(Q_{\%w})_i \quad \dots\dots\dots(13)$$

式中: B_i —— 某种燃料消耗量, kg/h, m³/h;
 $(Q_{\%w})_i$ —— 某种燃料的应用基低位发热量, kJ/kg, kJ/m³;
 b_i —— 某种燃料消耗量占总燃料消耗量份额;

$$b_i = \frac{B_i}{\sum_{i=1}^n B_i}$$

$Q_{\%w}$ —— 混合燃料的应用基低位发热量, kJ/kg, kJ/m³。

混合燃料的元素分析值及工业分析值均可按同样原则进行计算。

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下列各式换算为以应用基质量百分率表示的元素成分,然后再按式(13)的原则计算混合燃料的元素分析值及工业分析值:

$$C_q^* = \frac{0.54}{\rho_{qn}} [\text{CO} + \text{CO}_2 + \sum m(\text{C}_m\text{H}_n)] \quad \dots\dots\dots(14)$$

$$H_q^* = \frac{0.045}{\rho_{qn}} [2(\text{H}_2 + \text{H}_2\text{S}) + \sum n(\text{C}_m\text{H}_n)] \quad \dots\dots\dots(15)$$

$$O_q^* = \frac{0.715}{\rho_{qn}} [\text{CO} + 2(\text{CO}_2 + \text{O}_2)] \quad \dots\dots\dots(16)$$

$$S_q^* = \frac{1.43}{\rho_{qn}} \text{H}_2\text{S} \dots\dots\dots(17)$$

$$N_q^* = \frac{1.25}{\rho_{qn}} \text{N}_2 \dots\dots\dots(18)$$

$$A_q^* = \frac{0.1}{\rho_{qn}} \mu_a \quad \dots\dots\dots(19)$$

$$W_q^* = \frac{0.8}{\rho_{qn}} \text{H}_2\text{O} \dots\dots\dots(20)$$

式中: CO、CO₂、H₂、H₂S、N₂、O₂、H₂O、C_mH_n —— 分别为气体燃料中相应各成分的体积含量百分率, %;
 H_q^* 、 O_q^* 、 S_q^* 、 N_q^* 、 A_q^* 、 W_q^* —— 分别为换算后气体燃料相应各元素成分的应用基质量百分率, %;
 μ_a —— 气体燃料中含灰浓度, g/m³, 按实测;
 ρ_{qn} —— 标准状态下气体燃料的密度, kg/m³。
 按式(21)计算:

$$\rho_{\text{qm}} = 0.0125\text{CO} + 0.0009\text{H}_2 + \Sigma(0.54m + 0.045n) \frac{C_{\text{m}}H_n}{100} + 0.0152\text{H}_2\text{S} \\ + 0.0196\text{CO}_2 + 0.0125\text{N}_2 + 0.0143\text{O}_2 + 0.008\text{H}_2\text{O} + \frac{I_{\text{h}}}{1000} \dots\dots\dots(21)$$

6.1.4 本计算方法是根据输入—输出热量法和热损失法确定试验时实际运行工况下的锅炉毛效率。当需要与设计效率或保证效率进行比较时,应按第7章所述方法对某些输入物理热和热损失进行修正。

6.2 输入—输出热量法热效率计算

按式(22)计算:

$$\eta = \frac{Q_1}{Q_r} \times 100 \dots\dots\dots(22)$$

式中: η ——锅炉热效率,%;

Q_1 ——每千克(标准立方米)燃料的锅炉输出热量,kJ/kg、kJ/m³;

Q_r ——每千克(标准立方米)燃料的锅炉输入热量,kJ/kg、kJ/m³。

6.2.1 输入热量

按式(23)计算:

$$Q_r = Q_{\text{bw}} + Q_{\text{rx}} + Q_{\text{w1}} + Q_{\text{w2}} \dots\dots\dots(23)$$

式中: Q_r ——输入热量,kJ/kg、kJ/m³;

Q_{bw} ——燃料应用基低位发热量,kJ/kg、kJ/m³;

Q_{rx} ——燃料的物理显热,kJ/kg、kJ/m³;

Q_{w1} ——当用汽轮机抽汽或其他外来热源加热暖风器空气而带入锅炉系统内的热量,kJ/kg、kJ/m³;

Q_{w2} ——燃油雾化蒸汽带入锅炉的热量,kJ/kg、kJ/m³。

6.2.1.1 燃料的物理显热

按式(24)计算:

$$Q_{\text{rx}} = C_r(t_r - t_0) \dots\dots\dots(24)$$

式中: Q_{rx} ——燃料的物理显热,kJ/kg、kJ/m³;

t_0 ——基准温度,℃;

C_r ——燃料的比热,kJ/(kg·K)、kJ/(m³·K)。见附录D(补充件)。

t_r ——燃料温度,℃。

当固体燃料的温度低于0℃时,输入热量中还应扣除按式(25)计算的解冻用热量 Q_{μ} ,kJ/kg。

$$Q_{\mu} = 3.35(W^{\text{v}} - W^{\text{r}} \frac{100 - W^{\text{v}}}{100 - W^{\text{r}}}) \dots\dots\dots(25)$$

燃油比热按式(26)计算:

$$C_{r,\text{yo}} = 1.738 + 0.003(\frac{t_{r,\text{yo}} + t_0}{2}) \dots\dots\dots(26)$$

式中: $C_{i,yo}$ ——燃油比热, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$;

$t_{i,yo}$ ——燃油温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

气体燃料比热按式(27)计算:

$$C_{i,q} = \frac{1}{100} [1.298(\text{CO} + \text{H}_2 + \text{O}_2 + \text{N}_2) + 1.591(\text{CH}_4 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{S} + \text{H}_2\text{O}) + 2.094 \sum C_m H_n] \dots\dots\dots(27)$$

式中: $C_{i,q}$ ——气体燃料比热, $\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$;

6.2.1.2 外来热源加热空气带入热量

按式(28)或按式(29)、式(30)计算:

$$Q_{w1} = \frac{V_{sp}}{B} [C_{p,k} t_k - (C_{p,k})_o t_o] \dots\dots\dots(28)$$

或
$$Q_{w1} = \beta_{ly} [(h_k^0)' - (h_k^0)_o] \dots\dots\dots(29)$$

或
$$Q_{w1} = \frac{D_{w1}}{B} (h_{QR}^1 - h_{QR}^2) \dots\dots\dots(30)$$

式中: D_{w1} ——外来热源工质流量, $\text{kg}/\text{h}, \text{m}^3/\text{h}$;

Q_{w1} ——外来热源加热空气带入热量, $\text{kJ}/\text{kg}, \text{kJ}/\text{m}^3$;

B ——锅炉燃料消耗量, $\text{kg}/\text{h}, \text{m}^3/\text{h}$;

V_{sp} ——进入暖风器的风量, m^3/h ;

$C_{p,k}$ ——空气预热器进口温度下的空气定压比热, $\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$;查附录 C;

$(C_{p,k})_o$ ——基准温度下的空气定压比热, $\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$;查附录 C;

t_k ——空气预热器进口空气温度, $^{\circ}\text{C}$;

β_{ly} ——空气预热器进口空气量与理论空气量之比;

$(h_k^0), (h_k^0)_o$ ——分别为预热器进口理论空气焓与基准温度下的理论空气焓, kJ/m^3 ;

h_{QR}^1, h_{QR}^2 ——暖风器进、出口加热工质热焓, kJ/m^3 。

6.2.1.3 燃油雾化蒸汽带入的热量

按式(31)计算:

$$Q_{w2} = \frac{D_{w2}}{B} [h_{w2} - (h_{w2})_o] \dots\dots\dots(31)$$

式中: Q_{w2} ——雾化蒸汽带入热量, $\text{kJ}/\text{kg}, \text{kJ}/\text{m}^3$;

D_{w2} ——雾化用蒸汽量, kg/h ;

h_{w2} ——雾化蒸汽在入口参数下的焓, kJ/kg ;

$(h_{w2})_o$ ——基准温度下饱和汽的焓, kJ/kg 。

6.2.2 输出热量

按式(32)计算:

$$Q_1 = \frac{1}{B} [D_{\text{BQ}}(h_{\text{BQ}} - h_{\text{B}}) + D_{\text{ZQ}}(h'_{\text{ZQ}} - h_{\text{ZQ}}) + D_{\text{ZJ}}(h'_{\text{ZJ}} - h_{\text{ZJ}}) + D_{\text{BQ}}(h_{\text{BQ}} - h_{\text{B}}) + D_{\text{P}}(h_{\text{BQ}} - h_{\text{B}})] \quad \dots\dots\dots(32)$$

- 式中： Q_1 ——输出热量，kJ/kg、kJ/m³；
 D_{BQ} ——主蒸汽流量，kg/h；
 h_{BQ} ——主蒸汽焓，kJ/kg；
 h_{B} ——给水焓，kJ/kg；
 D_{ZQ} ——再热器入口蒸汽流量，kg/h；
 $h'_{\text{ZQ}}, h_{\text{ZQ}}$ ——分别为再热器进、出口蒸汽焓，kJ/kg；
 D_{ZJ} ——再热器减温水流量，kg/h；
 h_{ZJ} ——再热器减温水焓，kJ/kg；
 D_{BQ} ——饱和蒸汽抽出量，kg/h；
 $h_{\text{B}}, h_{\text{BQ}}$ ——分别为饱和水和饱和蒸汽焓，kJ/kg；
 D_{P} ——排污水流量，kg/h。

式(32)适用于一次再热，以给水作为喷水减温的机组。对于多次再热机组，应加入其余各级再热器吸收的热量。

6.3 热损失法热效率计算

热损失法锅炉热效率按式(33)计算：

$$\eta = 100 - \frac{Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6}{Q_1} \times 100$$

$$= 100 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6) \quad \dots\dots\dots(33)$$

- 式中： η ——锅炉热效率，%；
 Q_2 ——每千克(标准立方米)燃料的排烟损失热量，kJ/kg、kJ/m³；
 Q_3 ——每千克(标准立方米)燃料的可燃气体未完全燃烧损失热量，kJ/kg、kJ/m³；
 Q_4 ——每千克(标准立方米)燃料的固体不完全燃烧损失热量，kJ/kg、kJ/m³；
 Q_5 ——每千克(标准立方米)燃料的锅炉散热损失热量，kJ/kg、kJ/m³；
 Q_6 ——每千克(标准立方米)燃料的灰渣物理损失热量，kJ/kg、kJ/m³；
 q_2 ——排烟热损失百分率，%；
 q_3 ——可燃气体未完全燃烧热损失百分率，%；
 q_4 ——固体未完全燃烧热损失百分率，%；
 q_5 ——锅炉散热损失百分率，%；
 q_6 ——灰渣物理热损失百分率，%；

6.3.1 排烟热损失

锅炉排烟热损失为末级热交换器后排出烟气带走的物理显热占输入热量的百分率，按式(34)和式(35)计算：

$$q_2 = \frac{Q_2}{Q_1} \times 100 \quad \dots\dots\dots(34)$$

$$Q_2 = Q_2^{\text{Y}} + Q_2^{\text{H}_2\text{O}} \quad \dots\dots\dots(35)$$

- 式中： q_2 ——排烟热损失，%；
 Q_2^{Y} ——干烟气带走的热量，kJ/kg、kJ/m³；
 Q_2 ——排烟带走的热量，kJ/kg、kJ/m³；

$Q_{2,0}^{\circ}$ —— 烟气所含水蒸汽的显热, kJ/kg, kJ/m³。

6.3.1.1 干烟气带走的热量

按式(36)计算:

$$Q_{2,0}^{\circ} = V_{\text{干}} C_{p,\text{干}} (\theta_{\text{干}} - t_0) \dots\dots\dots(36)$$

式中: $Q_{2,0}^{\circ}$ —— 干烟气带走的热量, kJ/kg, kJ/m³;

$\theta_{\text{干}}$ —— 排烟温度, °C;

$C_{p,\text{干}}$ —— 干烟气从 t° 至 $\theta_{\text{干}}$ 的平均定压比热, kJ/(m³ · K);

一般情况下, 可代之以干烟气从 0°C 至 $\theta_{\text{干}}$ 的平均定压比热, kJ/(m³ · K)。当已知烟气成分时, 可按式(37)式计算:

$$C_{p,\text{干}} = C_{p,\text{CO}_2} \frac{RO_2}{100} + C_{p,\text{O}_2} \frac{O_2}{100} + C_{p,\text{N}_2} \frac{N_2}{100} + C_{p,\text{CO}} \frac{CO}{100} \dots\dots\dots(37)$$

近似计算按式(38):

$$C_{p,\text{干}} = C_{p,\text{CO}_2} \frac{RO_2}{100} + C_{p,\text{N}_2} \frac{(100 - RO_2)}{100} \dots\dots\dots(38)$$

式中: C_{p,N_2} , C_{p,CO_2} , C_{p,O_2} , $C_{p,\text{CO}}$ —— 分别为 N₂, CO₂, O₂ 和 CO 的平均定压比热, kJ/(m³ · K)。

可从附录 C 表 C1 中按排烟温度查取, 其中: RO₂ + O₂ + N₂ + CO = 100%。在 $\theta_{\text{干}} = 0 \sim 500^{\circ}\text{C}$ 时, 也可按附录 C 公式计算。

$V_{\text{干}}$ —— 每千克(标准立方米)燃料燃烧生成的干烟气体积, m³/kg, m³/m³;

对固体和液体燃料:

$$V_{\text{干}} = (V_{\text{干}}^{\circ})^{\circ} + (\alpha_{\text{干}} - 1)(V_{\text{干}}^{\circ})^{\circ} \dots\dots\dots(39)$$

式中: $(V_{\text{干}}^{\circ})^{\circ}$ —— 按应用基燃料成分, 由实际燃烧掉的碳计算的理论燃烧干烟气量, m³/kg;

$$(V_{\text{干}}^{\circ})^{\circ} = 1.866 - \frac{C_r^{\circ} + 0.375S_r^{\circ}}{100} + 0.79(V_{\text{干}}^{\circ})^{\circ} + 0.8 \frac{N_r^{\circ}}{100} \dots\dots\dots(40)$$

式中: C_r° —— 燃料应用基实际烧掉的碳质量含量百分率, %;

$$C_r^{\circ} = C_r - \frac{A_r \cdot \bar{C}}{100} \dots\dots\dots(41)$$

式中: C_r , A_r —— 分别为燃料应用基碳和灰分质量含量百分率, %;

\bar{C} —— 灰渣中平均碳量与燃煤灰量之比率, %;

$$\bar{C} = \frac{a_{\text{iz}} \cdot C_{\text{iz}}}{100 - C_{\text{iz}}} + \frac{a_{\text{fh}} \cdot C_{\text{fh}}}{100 - C_{\text{fh}}} + \frac{a_{\text{ch}} \cdot C_{\text{ch}}}{100 - C_{\text{ch}}} + \frac{a_{\text{im}} \cdot C_{\text{im}}}{100 - C_{\text{im}}} \dots\dots\dots(42)$$

式中： a_{lz} 、 a_m 、 a_{cb} 、 a_{lm} ——分别为炉渣、飞灰、沉降灰、漏煤中灰量占燃煤总灰量的质量含量百分率，%，(见第 6.3.3 条)；

C_{lz}^c 、 C_m^c 、 C_{cb}^c 、 C_{lm}^c ——分别为炉渣、飞灰、沉降灰、漏煤中含碳量，%，(见第 6.3.3 条)；

$(V_{gk}^c)^c$ ——按应用基燃料成分，由实际燃烧掉的碳计算的理论燃烧所需干空气量， m^3/kg ；

$$(V_{gk}^c)^c = 0.089(C_{\Sigma}^c + 0.375S^c) + 0.265H^c - 0.0333O^c \quad \dots\dots\dots(43)$$

对气体燃料：

$$V_{gy} = V_{gy}^c + (\alpha_{gy}^c - 1)V_{gk}^c \quad \dots\dots\dots(44)$$

$$V_{gy}^c = \frac{CO_2^c + CO^c + H_2S^c + \sum m C_m H_n^c}{100} + 0.79V_{gk}^c + \frac{N_2^c}{100} \quad \dots\dots\dots(45)$$

式中： V_{gy}^c ——按应用基燃料成分计算的理论燃烧干烟气量， m^3/m^3 ；

V_{gk}^c ——按应用基成分计算的理论干空气量， m^3/m^3 ；

$$V_{gk}^c = \frac{1}{21} [0.5CO^c + 0.5H_2^c + 1.5H_2S^c + \sum (m + \frac{n}{4}) C_m H_n^c - O_2^c] \quad \dots\dots\dots(46)$$

α_{gy} ——实测排烟过量空气系数，按式(47)计算：

$$\alpha_{gy} = \frac{21}{21 - (O_2 - 2CH_4 - 0.5CO - 0.5H_2)} \quad \dots\dots\dots(47)$$

式中： O_2 、 CH_4 、 CO 、 H_2 ——分别为排烟的干烟气中氧、甲烷、一氧化碳和氢的容积含量百分率，%；

RO_2 ——排烟干烟气中三原子气体的容积含量百分率，%。

m 、 n ——饱和碳氢化合物的原子数。

6.3.1.2 烟气中含水蒸气的显热

按式(48)计算：

$$Q_{H_2O}^{H_2O} = V_{H_2O} C_{p,H_2O} (\theta_{py} - t_0) \quad \dots\dots\dots(48)$$

式中： $Q_{H_2O}^{H_2O}$ ——烟气中所含水蒸汽热量， kJ/kg 、 kJ/m^3 ；

C_{p,H_2O} ——水蒸汽从 t_0 到 θ_{py} 温度间的平均定压比热， $kJ/(m^3 \cdot K)$ ；

一般情况下，可代之以水蒸汽从 $0^\circ C$ 至 θ_{py} 的平均定压比热，由附录 C 中查取。

V_{H_2O} ——烟气中所含水蒸汽容积， m^3/m^3 ，其中包括：

- 燃料中的氢燃烧产生水蒸汽；
- 燃料中的水分蒸发形成的水蒸汽；
- 空气中的湿分带入的水蒸汽；
- 燃油雾化等带入的水蒸汽；

可按式(49)计算：

$$V_{H_2O} = 1.24 \left[\frac{9H^y + W^y}{100} + 1.293 \alpha_{py} (V_{sk}^0)^2 d_k + \frac{D_{ws}}{B} \right] \dots\dots\dots (49)$$

对气体燃料:

$$V_{H_2O} = \frac{1}{100} [H_2^y + H_2S^y + \frac{m}{2} C_m H_n^y] + \frac{d_q}{0.804} + \frac{1.293 \alpha_{py}^2 d_k}{0.804} \dots\dots\dots (50)$$

d_q ——气体燃料的湿度,为每标准立方米干气体燃料中含水蒸汽的千克数,kg/m³。

d_k ——空气的绝对湿度,kg/kg(干空气),可由湿空气线图(附录 G)直接查得,亦可按式(51)求得:

$$d_k = 0.622 \frac{\frac{\phi}{100} (p_b)_0}{p_{act} - \frac{\phi}{100} (p_b)_0} \dots\dots\dots (51)$$

式中: ϕ ——按干、湿球温度查得的空气相对湿度,%;

p_{act} ——就地大气压,Pa;

$(p_b)_0$ ——在 t_0 温度下的水蒸气饱和压力,Pa;

在 0~50℃ 范围内,可按式(52)计算:

$$(p_b)_0 = 611.7927 + 42.7809 t_0 + 1.6883 t_0^2 + 1.2079 \times 10^{-2} t_0^3 + 6.1637 \times 10^{-4} t_0^4 \dots\dots\dots (52)$$

6.3.2 可燃气体未完全燃烧热损失

该项热损失由排烟中的未完全燃烧产物(CO、H₂、CH₄和 C_mH_n)的含量决定,系指这些可燃气体成分未放出其燃烧热而造成的热量损失占输入热量的百分率,按式(53)计算:

$$q_3 = \frac{1}{Q_i} V_{py} (126.36 CO + 358.18 CH_4 + 107.98 H_2 + 590.79 C_m H_n) \times 100 \dots\dots\dots (53)$$

式中: q_3 ——化学未完全燃烧热损失,%。

6.3.3 固体未完全燃烧热损失

燃煤锅炉的固体未完全燃烧热损失,即灰渣可燃物造成的热量损失和中速磨煤机排出石子煤的热量损失占输入热量的百分率。

对火床炉:

$$q_4 = \frac{337.27 A^{\sqrt{C}}}{Q_i} \dots\dots\dots (54)$$

对火室炉:

$$q_4 = \frac{337.27 A^{\sqrt{C}}}{Q_i} + q_4^* \dots\dots\dots (55)$$

式中: q_4 ——固体未完全燃烧热损失,%;

q_4^* ——中速磨煤机排出石子煤热损失,%。

$$q_7 = \frac{B_{22} Q_{5w}}{BQ_r} \times 100 \quad \dots\dots\dots (56)$$

式中: B_{22} ——中速磨煤机废弃的石子煤量, kg/h;
 Q_{5w} ——石子煤的实测低位发热量, kJ/kg。

对燃油锅炉, 一般灰分很少, 可以忽略不计, 若必须计算时, 其固体未完全燃烧热损失可按式(57)计算:

$$q_7 = \frac{3372.7}{Q_r} \mu V_{sv} \quad \dots\dots\dots (57)$$

式中: μ ——锅炉排烟中碳浓度, g/m³。

6.3.4 散热损失

锅炉散热损失 q_8 , 系指锅炉炉墙、金属结构及锅炉范围内管道(烟风道及汽、水管道联箱等)向四周环境中散失的热量占总输入热量的百分率。热损失值的大小与锅炉机组的热负荷有关。锅炉在额定蒸发量下的散热损失可根据附录 F 查得。当锅炉在其他蒸发量运行时, q_8 可按式(58)计算:

$$q_8 = q_8^D \frac{D^r}{D} \quad \dots\dots\dots (58)$$

式中: q_8 ——散热损失, %;
 q_8^D ——额定蒸发量下的散热损失, % (按附录 F);
 D^r ——锅炉的额定蒸发量, t/h;
 D ——锅炉效率测定时的实际蒸发量, t/h。

6.3.5 灰渣物理热损失

灰渣物理热损失, 即炉渣、飞灰与沉降灰排出锅炉设备时所带走的显热占输入热量的百分率, 按式(59)计算:

$$q_9 = \frac{A^r}{100Q_r} \left[\frac{a_{lz}(t_{lz} - t_0)C_{lz}}{100 - C_{lz}} + \frac{a_m(b_{py} - t_0)C_m}{100 - C_m^r} + \frac{a_{csh}(t_{csh} - t_0)C_{csh}}{100 - C_{csh}^r} \right] \quad \dots\dots\dots (59)$$

式中: q_9 ——灰渣物理热损失, %;
 t_{lz} ——由炉堂排出的炉渣温度, °C。
 当不能直接测量时, 固态排渣煤粉炉可取 800°C; 火床炉取 600°C; 液态排渣火室炉可取 $t_{lz} = t_3 + 100$ °C (t_3 为煤灰的熔化温度, °C), 也可取用事先协商一致的数据。
 t_{csh} ——由烟道排出之沉降灰温度, 可取为沉降灰斗上部空间的烟气温度, °C;
 C_{lz} 、 C_m 、 C_{csh} ——分别为炉渣、飞灰及沉降灰的比热, kJ/(kg·K), 按附录 C 查取。

当燃煤的折算灰分小于 10% (即 $A_m = \frac{4187A^r}{Q_{5w}} < 10\%$) 时, 固态排渣火室炉可忽略炉渣的物理热损失; 火床炉及液态排渣炉、旋风炉可忽略飞灰的物理热损失。

对燃油及燃气锅炉: $q_9 = 0$

6.4 简化热效率计算

热效率的计算可按具体条件对下列各项全部或部分简化:

- a. 将燃料的低位发热量作为输入热量;

- b. 忽略输入物理热及雾化蒸汽带入的热量；
 - c. 排烟热损失计算中忽略雾化蒸汽及燃料中氮引起的热损失；
- 并取： 干烟气比热 $C_{p,gy} = 1.38 \text{ kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$ ；
 水蒸气比热 $C_{p,H_2O} = 1.51 \text{ kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$ ；
 空气绝对湿度 $d_k = 0.01 \text{ kg}/\text{kg}$ (干空气)；
- d. 过量空气系数计算公式采用 $\alpha_{py} = \frac{21}{21 - O_2}$ ；
 - e. 煤粉炉忽略气体未完全燃烧热损失；
 - f. 忽略磨煤机排出石子煤的热损失；
 - g. 除液态排渣炉外，可忽略灰渣物理显热损失。

7 换算到保证条件下的热效率

锅炉试验期间，要求基准空气温度、外部预热的燃烧空气温度、给水温度、再热器进口蒸汽温度及燃料特性(主要为 Q_{bw} 与 W^y)等初始条件都符合规定的要求(如设计值或保证值)。当它们与规定值有偏差时，试验所得的锅炉热效率应换算到设计参数下的热效率。由于锅炉结构型式众多，不可能对这种换算提出一套通用的曲线或公式，因此，锅炉制造厂应按协议为其生产的锅炉提供这种修正曲线等资料，并得到有关各方事先认可。

如果试验所用燃料特性在预先约定的变化范围内，可以不进行由于燃料特性变化对热效率的修正。当超出这一变化范围而在协商一致的基础上，也可按第 7.2.4 条对燃料特性的变化进行修正。

在上述各项修正中，以基准空气温度和给水温度偏差的修正最为主要，在有关各方事先协商一致的情况下，可按下述原则进行热效率的修正。

7.1 输入热量的修正

7.1.1 将保证的进风温度替代燃料物理热及雾化蒸汽带入锅炉热量公式中的试验基准温度。

7.1.2 当以暖风器进风量计算外来热源加热空气带入锅炉热量时，在公式中以保证的进风温度代替试验基准温度。

7.2 热损失的修正

7.2.1 进风温度偏差的换算

进风温度与保证温度的偏差，主要影响排烟热损失和灰渣物理显热损失，除了将修正后的输入热量代替试验时的输入热量之外，还应进行如下各项换算。

7.2.1.1 对电站锅炉中最常见的不带暖风器的送风系统，在排烟热损失及灰渣物理热损失的计算中，除了以保证的进风温度替代试验基准温度外，还应对排烟温度进行换算，计算公式如式(60)：

$$\theta_{py}^b = \frac{\epsilon (\theta_{ky} - \theta_{py}) + \theta_{ky} (\theta_{py} - t_0)}{(\theta_{ky} - t_0)} \dots\dots\dots (60)$$

式中： θ_{py}^b ——换算到保证进口空气温度时的排烟温度，℃；

ϵ ——保证的进口空气温度，℃；

t_0 ——实测基准温度，℃；

θ_{ky} ——空气预热器进口实测烟气温度(如为双级交错布置时，为低温级空气预热器)，℃；

θ_{py} ——实测排烟温度，℃。

将保证的进口空气温度 ϵ 及换算后的排烟温度 θ_{py}^b 和输入热量，分别替代热损失计算公式中的 t_0 及 θ_{py} ，即可求得修正后的热损失值。

7.2.1.2 当锅炉带有暖风器并投入使用时，锅炉主空气预热器进口空气温度 ϵ 高于送风机进口的进风温度 t_0 ，此时有两种情况：

- a. 当进风温度 t_0 发生变化，而暖风器出口的空气加热温度 ϵ ，保持设计值不变时，排烟温度不变，

热损失的修正只需将实测值 t_a 代之以保证值 t_a^0 , 并重新计算 Q_{w1} 。

b. 当进风温度 $t_a = t_a^0$, 而暖风器的加热空气温度 t_k 发生变更, 则排烟温度将因 t_k 的改变而随之改变。排烟温度可按式(60)求得, 但式中 t_a 应代之以实测的暖风器出口风温 t_k , 式中的 t_a^0 代之以暖风器出口风温的设计值 t_k^0 , 用求得的 θ_{py}^0 代替实测的 θ_{py} 。对输入热量中的 Q_{w1} 也作相应的修正, 即可算出修正后的热损失。

c. 当进风温度及暖风器的加热温度都与设计值不同时, 除了修正输入热量中的 Q_{w1} 项以外, 还应以 t_a^0 替代 t_a ; 并象 b 项中所述那样用求得的 θ_{py}^0 代替 θ_{py} , 从而求得换算后的热损失。

7.2.2 给水温度偏差的换算

给水温度与设计值的偏差所引起排烟温度的变化可按式(61)进行计算(当偏差值小于 10°C 时, 可不进行该项修正):

$$\theta_{py}^0 = \theta_{py} + \left[\frac{\theta_{sm} - \theta_{sm}^0}{\theta_{sm} - t_{gs}} \right] \left[\frac{\theta_{py} - t_k}{\theta_{py} - t_k^0} \right] (t_{gs}^0 - t_{gs}) \quad \dots\dots\dots(61)$$

式中: θ_{py}^0 ——换算到设计给水温度时的排烟温度, $^\circ\text{C}$;

θ_{py} ——实测排烟温度, $^\circ\text{C}$;

$\theta_{sm}, \theta_{sm}^0$ ——分别为省煤器进、出口烟气实测温度(如双级交错布置时为低温级省煤器), $^\circ\text{C}$;

θ_{ky}, t_k ——分别为空气预热器进口实测烟气和空气温度(如双级交错布置时为低温级空气预热器), $^\circ\text{C}$;

t_{gs} ——实测给水温度, $^\circ\text{C}$;

t_{gs}^0 ——设计给水温度, $^\circ\text{C}$ 。

将所得的 θ_{py}^0 代替热损失计算公式中的 θ_{py} , 即可算得修正后的热损失。

7.2.3 当进风温度和给水温度都偏离设计值时, 可以先按第 7.2.1 条进行进风温度偏差的修正, 再按第 7.2.2 条进行给水温度偏差的修正。

7.2.4 将燃料中各组分及低位发热量的设计值替代排烟热损失计算有关公式中的试验值, 即可求得修正后的该项热损失值。

7.3 锅炉热效率的修正

用经修正后的输入热量及热损失, 由式(22)与式(33)计算所得的锅炉热效率, 就是换算到保证条件下的热效率, 可以和热效率的保证值(或设计值)相比较。

8 锅炉净效率

锅炉机组的净效率是考虑了锅炉自身需用的热耗和电耗后的效率, 可由式(62)计算而得:

$$\eta = \frac{\eta Q_i}{Q_i + \Sigma Q_{sv} + \frac{b}{B} 29310 \Sigma P} \times 100 \quad \dots\dots\dots(62)$$

式中: η ——锅炉毛效率, 也即第 6.2 条中所提的热效率, %;

ΣQ_{sv} ——锅炉自用热耗, 系指蒸汽驱动辅助设备和吹灰等所用外来蒸汽热耗, $\text{kJ/kg}, \text{kJ/m}^3$;

ΣP ——锅炉设备制粉系统、送风机、引风机、烟气再循环风机、强制循环泵、除渣及除灰系统、电除尘器等辅助机械电动机的实际功率, kW ;

b ——电厂发电标准煤耗, $\text{kg}/(\text{kW} \cdot \text{h})$;

B ——燃料消耗量, $\text{kg/h}, \text{m}^3/\text{h}$;

Q_i ——锅炉输入热量, $\text{kJ/kg}, \text{kJ/m}^3$ 。

9 锅炉蒸发量、蒸汽参数及其他运行特性试验

9.1 锅炉蒸发量、蒸汽压力与温度

9.1.1 锅炉验收试验中,测定锅炉蒸发量、蒸汽压力与温度可在锅炉热效率试验及其他有关的性能试验中同时进行。测定时间应不少于 2h。

9.1.2 锅炉蒸发量及再热蒸汽、减温喷水流量的测定见第 5.4 条。

9.1.3 蒸汽温度及给水、喷水温度的测量见第 5.2 条。

9.1.4 蒸汽压力测量见第 5.3 条。

9.1.5 应同时在试验中测取和记录其他各热力参数,详见本标准第 5 章。

9.1.6 除在额定蒸发量下进行的两次有效测定外,还应在 70% 额定蒸发量下对有关保证参数进行测定。

9.2 锅炉最大连续蒸发量

9.2.1 测定目的是为了检验锅炉机组设计(或保证)最大连续蒸发量。

9.2.2 试验中应监测的内容:

- a. 锅炉蒸发量、蒸汽压力与温度;
- b. 炉水和蒸汽品质;
- c. 汽水系统的安全性;
- d. 调温装置运行适应性;
- e. 受热面的沾污情况与金属壁温;
- f. 锅炉各辅机、热力系统及自控装置的适应能力等。

试验过程中,还应严密监测锅炉其他运行参数。

9.2.3 试验时间应保持 2h 以上。

9.2.4 所测得的最大蒸发量数值应对测试误差及蒸汽与给水参数偏离设计的焓值进行修正。

9.3 最低稳定燃烧负荷试验和液态排渣临界负荷试验

9.3.1 试验目的为确定固态排渣煤粉锅炉不投油或气体燃料助燃而能够长期稳定燃烧所能达到的最低负荷,或液态排渣炉稳定流渣的临界负荷。

9.3.2 应确保安全。试验前,需检查和确认火焰监测系统和灭火保护装置的性能良好,并有快速投入助燃燃料及将负荷转给其他锅炉等措施。

9.3.3 试验应以 3%~10% 额定负荷的幅度逐级降低锅炉负荷,并在每级负荷下保持 15~30min,直至燃烧稳定的最低负荷(按协议或至锅炉的保证最低稳定燃烧负荷)。

液态排渣炉的最低稳定燃烧负荷通常低于液态排渣临界负荷,在逐级降低锅炉负荷时,每级负荷下至少保持稳定 30min 以上。

9.3.4 在降负荷过程中应密切监测炉膛内燃料着火情况、炉膛负压及过量空气系数。在每级试验时,均需观测和记录各主要运行参数。试验中的给水温度应和设计值相近,最低稳定燃烧负荷下的试验持续时间不少于 2h。

9.4 汽、水品质

9.4.1 锅炉试验中需要进行汽、水品质试验的场合如下:

- a. 锅炉验收试验;
- b. 锅炉水循环系统或汽水分离系统改变时;
- c. 锅炉运行方式改变(如由带基本负荷变为带冲击负荷或调峰);
- d. 锅炉补给水处理方式改变或给水质量明显恶化时;
- e. 发现过热器或汽轮机通流部分严重积盐时。

9.4.2 水、汽取样

9.4.2.1 为了使取出的水、汽样品具有代表性,水、汽取样应遵循 SS-2-1 中的规定。

9.4.2.2 水、汽取样位置及推荐采用的取样装置见表 18。

9.4.2.3 蒸汽取样器入口要求尖锐且无毛刺,以减小对汽流的干扰。

9.4.2.4 水、汽取样装置及引出管均采用不锈钢材料。

9.4.3 试验内容与方法

9.4.3.1 试验准备

- a. 试验大纲编制参照第 4.2.15 条;有关热工仪表的校验见第 5.1.4 条;
- b. 根据所采用的汽、水分析方法,准备必要的仪表和药品,如 pH 计、pNa 计、分光光度计、导电仪等;制备无硅水、无钠水,标定标准曲线,检查 pNa 电极的线性等;
- c. 对每个测点进行检查 确认无误后挂好标牌;
- d. 试验前 2~3 天,各取样器应投入运行,将取样流量调整到设计范围,冷却水量调整到使样品温度为 30~40℃。

9.4.3.2 主要试验内容及试验方法见表 19。

表 18

名称	取 样 位 置	取 样 装 置	备 注
锅 水	锅筒正常水位下 200~300mm,靠近一次分离元件的排水出口处。分段蒸发的锅炉布置在盐段水室	多孔管式取样管	a. 取样管应避开给水分配管和加药管; b. 取样管长度应与锅筒内装设分离器区长度相同
给 水	省煤器前从给水泵后的高压给水管上	管式取样管	
清洗水	取样器沿溢水通道宽度布置,装在溢水门坎下 30mm 处。双侧溢水清洗装置,在前、后溢水通道中各布置一个取样器,样品引出后合并成一根管路	清洗水取样器(附录 Q 中 Q1)(斗式)	有蒸汽清洗的高压、超高压锅炉分析清洗装置工况用
饱和蒸汽	应尽量在锅筒刚出口处的饱和蒸汽引出管上取样,取样点不少于三点,并沿锅筒长度均匀布设	探针式取样器(附录 Q 中 Q2)多孔型取样器(附录 Q 中 Q3)	应等速取样,按 90%额定负荷设计取样器;安装时样品入口小管正对气流,偏角不大于 5°
过热蒸汽	在锅炉出口的集汽联箱或主蒸汽管道上	乳头式取样器(附录 Q 中 Q4) 多孔渐缩型取样器(附录 Q 中 Q5)	应等速取样,按 90%额定负荷设计取样器。对引出管设在端部者,要使样品在小孔或缝隙中的流速为取样母管中汽流速度的两倍,以此来确定母管直径;安装时要使样品引出端向下倾斜 3°~5°,以利于湿分的疏出。安装时,取样管入口应正对气流,偏角不大于 5°
锅内蒸汽	蒸汽清洗装置前	乳头式取样器(附录 Q 中 Q6)	
	旋风分离器立式圆型顶帽出口	乳头式取样器(圆环型)(附录 Q 中 Q7)	
	旋风分离器水平波型板顶帽出口; 清洗装置后、二次分离元件前; 一次分离元件出口	缝隙式取样器(附录 Q 中 Q8) 缝隙式取样器(附录 Q 中 Q9)	

表 19

试验内容	试验对象与目的	试验条件与方法	备注
锅水浓度试验	临界含钠量 对以化学软化水作为补充水、且补充水率较大的中压及以下锅炉	在锅炉额定蒸发量和参数下,保持正常水位和燃烧稳定。试验中锅水 pH 值保持在 9.5~10 之间 提高锅水浓度的方法如下: a. 自然浓缩法(关闭排污阀门); b. 向锅水中加药(临界含钠量试验加磷酸三钠或氯化钠、硫酸钠,临界含硅量试验加硅酸钠); c. 锅水浓度升高速率按表 20。 当蒸汽、品质超过表 21 所列数值时,表明锅水浓度已达临界值,此时立即降低锅水浓度,直至蒸汽品质恢复正常	表 20 为锅水浓度升高速率;表 21 为饱和蒸汽和过热蒸汽质量标准
	临界含硅量 对以化学除盐水作为补给水的高压及以上锅炉。对压力为中压及以下锅炉可视具体情况而定		
负荷特性试验	不同负荷试验 确定锅炉最大允许负荷,了解锅炉负荷与蒸汽品质之关系	保持正常水位,燃烧稳定,将锅炉蒸发量从最低允许值至额定值(或最大连续蒸发量),由低到高分 3~4 点进行试验,各蒸发量下尽量保持锅筒压力一致,且维持 2~3h	锅水含盐量维持在最高允许值的 75%~80%
	负荷波动试验 对调峰、带中间负荷或冲击负荷的锅炉更有必要进行该项试验	尽量保持锅筒水位稳定,按有关规程规定的负荷变化速率(电厂运行规程)锅炉蒸发量由最低允许值至额定值之间进行波动,并在最低和最高蒸发量处各稳定 0.5h	
水位特性试验	不同水位试验 确定锅炉最高允许水位,了解锅筒水位与蒸汽品质之关系	稳定蒸发量和参数下,并保持燃烧稳定。从最低和最高允许水位之间由低到高选取 3~4 点进行试验。每一水位下稳定 2~3h	锅水含盐量维持在最高允许值的 75%~80%
	水位波动试验 对调峰及带中间负荷或冲击负荷的锅炉尤为必要进行该项试验	在额定蒸发量、设计参数下进行,保持燃烧稳定。将水位在最低至最高允许值之间来回变化,变化速率按机组特性而定,一般为每分钟 10~30mm。在最低和最高水位处各稳定 0.5h	
锅筒压力试验	仅对超高压及以上锅炉进行,为确定锅筒压力与蒸汽选择性携带的关系	保持某一蒸发量(如 80%额定蒸发量)、正常水位、燃烧稳定,锅水 pH 值维持在 9.5~10.0 之间。选取最大工作压力以下 3~4 点(差值为 1~1.5MPa),压力由低到高逐点进行试验,每一压力下稳定 2~3h	锅水含盐量维持在最高允许值的 75%~80%
最大补充水率试验	一般仅对给水质量较差的高压及以下锅炉才进行该项试验	额定蒸发量及参数、正常水位、燃烧稳定,试验中逐步增加补充水率,观察蒸汽品质的变化。当蒸汽品质(钠和二氧化硅含量)超出表 21 数值时,补充水率达到临界值。此时立即降低锅水浓度直至蒸汽品质恢复正常	对于有蒸汽清洗装置的锅炉,以蒸汽二氧化硅含量为标准确定最大允许的补充水率

表 20 推荐的锅水浓度增长速度

项目 单位	临界含钠量试验		临界二氧化硅含量试验		试验时间
	分段蒸发盐段	单段蒸发	高压、超高压	亚临界压力	
mg/(L·h)	150	50	0.04~0.05	0.02~0.03	至蒸汽品质恶化

表 21 饱和蒸汽和过热蒸汽质量标准

炉 型	压 力 MPa	钠 $\mu\text{g}/\text{kg}$		二氧化硅 $\mu\text{g}/\text{kg}$
		磷酸盐处理	挥发性处理	
锅筒锅炉	3.82~5.78	≤ 15		≤ 20
	5.88~18.63	≤ 10	$\leq 10^{11}$	
直流锅炉	5.88~18.63	$\leq 10^{11}$		

注:1) 争取标准为 $\leq 5\mu\text{g}/\text{kg}$ 。

9.4.3.3 试验期间工况记录按表 22。

表 22 年 月 日

项目 单位 时间	电负荷	蒸汽 流量	锅筒 压力	过热蒸 汽压力	过热蒸 汽温度	锅筒 水位	减温水 流量	给水 流量	排污水 流量	给水 压力	锅水 温度	给水 温度	省煤器 出水温度
	MW	t/h	MPa	MPa	$^{\circ}\text{C}$	mm	t/h	t/h	t/h	MPa	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$

9.4.3.4 化学分析项目见表 23,化学分析方法按《火力发电厂水汽试验方法》(水电部颁发,1984年版)进行。

表 23

试验对象	锅 水							给 水						
	钠	二氧化硅	氯根	磷酸根	碱度	电导率	pH	钠	二氧化硅	铜	铁	电导率	溶解氧	油
符 号	Na	SiO ₂	Cl	PO ₄ ³⁻	JD	DD	/	Na	SiO ₂	Cu	Fe	DD	O ₂	Y
单 位	$\mu\text{g}/\text{L}$				毫克 当量/L	$\mu\text{S}/\text{cm}$		$\mu\text{g}/\text{L}$				$\mu\text{S}/\text{cm}$	$\mu\text{g}/\text{L}$	
试验 时间														
试验对象	饱 和 蒸 汽					过 热 蒸 汽								
	钠	二氧化硅	铜	铁	导电度	钠	二氧化硅	铜	铁	导电度				
符 号	Na	SiO ₂	Cu	Fe	DD	Na	SiO ₂	Cu	Fe	DD				
单 位	$\mu\text{g}/\text{kg}$				$\mu\text{S}/\text{cm}$	$\mu\text{g}/\text{kg}$				$\mu\text{S}/\text{cm}$				
试验 时间														

9.4.3.5 工况记录及化学分析的时间间隔可按具体情况自行规定。

9.5 汽水系统阻力和压差

9.5.1 试验目的为测定下述系统或管组的汽水侧阻力或压差,以便与设计值相比较。

- a. 锅炉汽水系统整体;
- b. 再热器、过热器、省煤器等部分系统;
- c. 上述 a 或 b 系统中某一部分管组。

9.5.2 汽水系统或管组的压差 Δp 为系统或管组进、出口实测静压差,即:

$$\Delta p = p' - p'' \dots\dots\dots(63)$$

式中: Δp ——汽水系统或管组的压差,Pa;

p', p'' ——分别为汽水系统或管组进、出口实测的静压,Pa。

9.5.3 汽水系统或管组的阻力 Δp_f (即流动阻力)可根据系统或管组实测进、出口静压差按表 24 计算确定。表中,当流体向上流动时, Δp_{rw} 前为“-”号;当流体向下流动时, Δp_{rw} 前为“+”号。

表 24 汽水系统管组阻力计算

名 称		阻力 $\Delta p_f, Pa$	备 注
直 流 锅 炉 本 体		Δp	
锅 炉 垂 直 管 组		$\Delta p \pm \Delta p_{rw}$	Δp_{rw} 为管道重位压差
直 流 锅 炉 辐 射 区 汽 水 混 合 物 管 屏 和 管 道	当所测管道重位压差和进、出口动压差与流动阻力相比很小时	Δp	—
	当管道重位压差和进、出口动压差较大而不能忽略时	$\Delta p \pm \Delta p_{rw} - \Delta p_d$	Δp_d : 为管道进、出口动压差
过 热 器	一 般 情 况 下	Δp	—
	对某一过热器部件进行深入分析研究时	$\Delta p \pm \Delta p_{rw} - \Delta p_d$	—
再 热 器		$p \pm \Delta p_{rw} - \Delta p_d$	—
省 煤 器 及 给 水 管 道		$\Delta p \pm \Delta p_{rw}$	—

9.5.4 管组或管道重位压差 Δp_{rw} (Pa) 用管道(组)进、出口平均压力和实测温度值并按式(64)计算:

$$\Delta p_{rw} = 9.807 \bar{\rho} \Delta H \dots\dots\dots(64)$$

式中: ΔH ——管道进、出口之间高度差,m;

$\bar{\rho}$ ——管道中流体的平均真实密度,kg/m³。

9.5.5 管道进、出口动压差 Δp_d (Pa) 按式(65)计算:

$$\Delta p_d = \frac{1}{2} [\rho'(W')^2 - \rho''(W'')^2] \dots\dots\dots(65)$$

式中: ρ', ρ'' ——分别为管道进、出口流体密度,kg/m³;

W', W'' ——分别为管道进、出口流体速度,m/s。

9.5.6 温度、压力以及流量测定按第 5.2、5.3、5.4 条的规定。

9.5.7 测定静压时,必须注意对压力指示仪表处与测点之间传压管中液柱重位压差的修正;如采用测定某段管道进、出口静压的方法来确定该管道的压降会带来较大误差时,可采用差压计测定压差值,此

时还应对进、出口测定之间由高度差引起的传压管道中重位压差进行修正。

9.6 空气预热器漏风

9.6.1 试验目的为考核空气预热器漏风性能。

9.6.2 空气预热器漏风率的测定与计算

9.6.2.1 空气预热器漏风率定义为漏入空气预热器烟气侧的空气质量与进入空气预热器的烟气质量之比,见式(66):

$$A_L = \frac{\Delta m_k}{m_y} \times 100 = \frac{m_y' - m_y}{m_y} \times 100 \dots\dots\dots(66)$$

式中: A_L ——空气预热器漏风率, %;

Δm_k ——漏入空气预热器烟气侧的空气质量, kg/kg, kg/m³;

m_y', m_y ——分别为烟道进、出口处烟气质量, kg/kg, kg/m³。

9.6.2.2 空气预热器漏风率的测定见附录 K(补充件)。

9.6.3 试验及测定

9.6.3.1 试验应在额定负荷或接近额定负荷下进行。

9.6.3.2 应同时用同种类型的分析仪测量相应区段烟道的进、出口烟气成分进行计算。

9.6.3.3 测定烟气成分见本标准第 5.7 条。

9.6.3.4 试验前应稳定锅炉蒸发量及风量,同时记录炉膛负压;试验过程中入炉燃料和空气量应保持不变;抽取样品应保持连续性,有效分析次数不小于 5 次。

9.7 烟风道静压差

9.7.1 测定目的为检验额定蒸发量时各段烟风道设计的静压差或检查各段烟风道及有关风门是否有异常情况。

9.7.2 采用 U 型管压力计和薄膜式压力计测定烟风道静压(见第 5.3.3 条)。当就地测量时,采用 U 型管压力计;长期监测时(如表盘指示),一般采用薄膜式压力计。

9.7.3 有关测点安装、测点数量以及注意事项见第 5.3.3 条。

9.8 制粉系统主要特性参数测定

9.8.1 测定目的

锅炉验收试验中,为评定制粉系统特性以及测定锅炉机组热效率、净效率或进行某些运行特性试验提供数据,需对主要特性参数(磨煤机出力、耗电量、通风量和煤粉细度)进行测定。

9.8.2 主要特性参数定义

9.8.2.1 磨煤机出力

单位时间内进入磨煤机的煤量, t/h。

9.8.2.2 磨煤机耗电量和制粉系统总耗电量

磨煤机耗电量为其电动机输出轴功率 P_{out} , kW; 制粉系统总耗电量 P_{ZF} 为其范围内所有主要设备(磨煤机、排粉机或一次风机、给煤机、密封风机等)驱动电机所消耗的功率之和,即 $\sum P_i$, kW。

9.8.2.3 磨煤机通风量

进入磨煤机用于干燥原煤和输送煤粉的风量, m³/h。

9.8.2.4 煤粉细度

按规定方法,用标准筛筛分后留在筛上的剩余煤粉质量与所筛分的总煤粉质量之比,以 R_x , % 表示。

注: x 为筛网孔径, μm 。

9.8.3 磨煤机出力测定

9.8.3.1 采用称量进入磨煤机的给煤量。对于中速磨煤机,还应同时称量石子煤量(相应于给煤量)。

9.8.3.2 称量时采用的方法随磨煤机型式及有无计量装置的不同,一般有下列几种:

a. 自动称量法,即利用磨煤机系统中独用的自动磅秤,每次卸空后应对自动磅秤进行校验和检查零位;

b. 给煤机特性法,用经标定过的给煤机的给煤量特性来测定给煤量,同时需测定煤的堆积密度。当精度能满足试验要求时采用。

c. 直接截取称量法,采用专用磅秤,用以称量无其他办法能获得供入磨煤机的煤量,试验前磅秤需经校验。

9.8.3.3 测量的时间间隔见表 25。

表 25

名 称	测 量 时 间 间 隔 及 次 数
装有自动磅秤且在运行中有直接指示时	每 10~15min 测读、记录一次
积 算 仪	试验开始及结束时各记录一次读数及起、止时间
给 煤 量 特 性 法	每 10~15min 测量一次给煤机转速; 每个工况应测定堆积密度 1~2 次
直 接 截 取 称 量	每个工况称量应不少于 3 次

9.8.4 磨煤机耗电量及制粉系统总耗电量测定

9.8.4.1 用经校验过的功率表或电度表测定。

9.8.4.2 磨煤机驱动电机输出轴功率按式(67)计算:

$$P'_{MM} = P_{MM}\eta \dots\dots\dots(67)$$

式中: P'_{MM} ——磨煤机驱动电机输出轴功率, kW;

P_{MM} ——实测磨煤机电机功率, kW;

η ——根据电动机实测功率在电动机效率曲线上查得的电动机效率, %。

一般情况下不作效率修正。通常直接采用实测所得的各项功率。按第 9.8.4.3 和 9.8.4.4 条进行各项计算。

9.8.4.3 制粉系统总耗电量按式(68)计算:

$$P_{ZF} = \Sigma P_i = P_{MM} + P_{FF} + P_{GM} + P_{MF} + \dots\dots\dots(68)$$

式中: P_{ZF} ——制粉系统总耗电量, kW;

P_{FF} 、 P_{GM} 、 P_{MF} ——制粉系统排粉机(或一次风机)、给煤机、密封风机等所采用的各驱动电机实测功率, kW。

9.8.4.4 磨煤机耗电率与制粉系统总耗电率按式(69)、式(70)计算:

$$E_{MM,t} = \frac{P'_{MM}}{B_{MM}} \dots\dots\dots(69)$$

$$E_{ZF,t} = \frac{\Sigma P_{ZF}}{B_{MM}} \dots\dots\dots(70)$$

式中: $E_{MM,t}$ ——磨煤机耗电率, (kW·h)/t;

$E_{ZF,t}$ ——制粉系统耗电率, (kW·h)/t;

B_{MM} ——磨煤机出力, t/h。

9.8.5 磨煤机通风量测定

9.8.5.1 在磨煤机前或后的管道合适部位上进行测量。对直吹式系统,一般在磨煤机前测量;对中间煤粉仓系统,在粗粉分离器后的管道上测量,同时还须测取再循环风量。

9.8.5.2 在磨煤机后测量时,总风量中包括系统漏风(对负压系统)或密封风量(对正压系统)。

9.8.5.3 测孔前后应有一定长度的直管段,建议测孔上游直段不少于5倍管道内径,测孔下游直段不少于3倍管道内径。

9.8.5.4 有关测点的布置及测点的确定,按第5.4.4条和附录H的规定。

9.8.5.5 一般须测定动压、静压、介质温度和大气压力。测量方法见第5.2、5.3、5.4条。

9.8.5.6 测量的时间间隔按下列规定:

- a. 固定式测量装置:每10~15min一次;
- b. 移动式动压测定管(包括毕托管):一般每个工况测定一次;
- c. 静压、介质温度、大气压力:每10~15min一次,且应注意与动压测定同时进行。

9.8.6 煤粉细度测定

9.8.6.1 煤粉取样应尽量在垂直管道上进行。

对直吹系统,在煤粉分离器(或竖井)出口管道上采用经标定的等速取样器采取样品,每个工况1~2次。

对中间储仓式制粉系统,一般可在细粉分离器下粉管道上用旋转式活动取样管采样,每个工况2~3次,并将所得煤粉细度乘以细粉分离器效率进行修正;当验收试验或鉴定试验时,应尽量在粗粉分离器出口管道上用内外静压平衡等速取样法采样。

9.8.6.2 采用等速取样的取样孔及取样点的确定方法按第5.4.4条和附录H,但其数量一般比测定动压时多35%~50%。

9.8.6.3 对同一个煤粉样,应同时采用三种以上不同规格的筛子进行筛分。常用标准筛孔径规格为45 μm 、90 μm 、200 μm 、1000 μm ,不同煤种使用筛子规格如下:

- a. 褐煤:孔径为90 μm 、200 μm 、1000 μm 的标准筛;
- b. 其他煤种:孔径为45 μm 、90 μm 、200 μm 的标准筛;

9.8.6.4 应对煤粉样品的代表性进行评定。同一个煤粉样品至少在三种不同规格的标准筛上进行筛分,将所得的三个煤粉细度取对数,点于 $\lg \ln R_x - \lg r$ 坐标图上(图3),若三点不在同一根直线上,则应寻找原因重新取样。

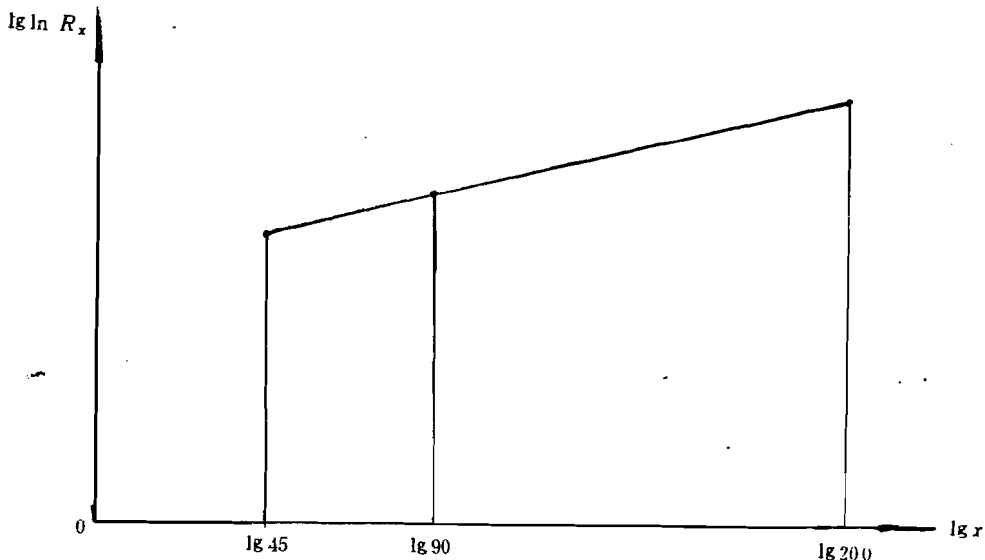


图3 煤粉颗粒特性曲线

9.8.6.5 煤粉颗粒特性均匀系数 n 按式(7)计算:

$$n = \frac{\lg \ln \frac{100}{R_{x_1}} - \lg \ln \frac{100}{R_{x_2}}}{\lg x_1 - \lg x_2} \dots\dots\dots(71)$$

式中: x_1, x_2 —— 分别表示两种不同规格筛子的孔径, μm 。

10 误差分析

10.1 测量误差分类及特征

测量误差分类见表 26。

表 26

误差类别	定 义 及 特 征	处 理
随机误差	由随机出现的偶然因素而引起的误差。数值大小和正负方向不定, 并且有抵偿性, 其分布一般符合正态分布定律	进行符合正态分布的判别及计算误差
系统误差	由仪表缺陷、周围环境的改变、个人的习惯与偏向等因素引起的误差。可分为已定系统和未定系统两种误差。前者较容易掌握, 后者不能确切掌握也没有必要掌握, 只需估计它不会超出某一极限范围	已定系统误差可根据产生的原因加以清除; 未定系统误差也可作为随机误差计算
疏失误差	在测量过程中, 由某些突然发生的不正常因素或测量中的疏忽而引起的明显歪曲测量结果的误差(但不应将由于工况波动引起的测量值的变化数据混为一谈)	应对其进行消除

10.2 系统误差和疏失误差的消除

10.2.1 已定系统误差, 可通过多次测量及掌握其规律对测值进行修正而消除。

10.2.2 未定系统误差, 一般不作修正, 但在误差合成时计入。

10.2.3 疏失误差可采用本标准附录 L 中格拉布斯(Grubbs)方法及简化消除方法进行消除(但不应将由于工况波动而引起的测量值变化数据看作疏失误差剔除)。

10.3 符合正态分布的随机误差判别和计算

10.3.1 按 GB 4882 判别随机误差分布符合正态分布定律。

10.3.2 随机误差的计算

10.3.2.1 标准差(标准偏差)

无限次测量的标准差按式(72)计算, 有限次测量的标准差按式(73)计算:

$$S = \left[\frac{\sum v_i^2}{n} \right]^{1/2} \dots\dots\dots(72)$$

$$S = \left[\frac{\sum v_i^2}{n-1} \right]^{1/2} \dots\dots\dots(73)$$

式中: S —— 标准差;

v_i —— 观测值 x 与算术平均值 \bar{x} 的偏差;

$$v_i = x_i - \bar{x} \dots\dots\dots(74)$$

n ——观测次数。

10.3.2.2 测量值算术平均值 \bar{x} 的标准差 $S_{\bar{x}}$ 按式(75)计算:

$$S_{\bar{x}} = \frac{S}{\sqrt{n}} = \left[\frac{\sum_{i=1}^n v_i^2}{n(n-1)} \right]^{1/2} \dots \dots \dots (75)$$

10.3.2.3 极差(极限偏差)

测量值的极差为标准差与置信系数的乘积,按式(76)计算:

$$R = t \times S \dots \dots \dots (76)$$

式中: R ——测量值的极差;

t ——置信系数。

测量值算术平均值的极差为算术平均值偏差与置信系数的乘积,按式(77)计算:

$$R_{\bar{x}} = t \times S_{\bar{x}} = \frac{tS}{\sqrt{n}} \dots \dots \dots (77)$$

置信系数与测量值置信水平 $(1-\alpha)$ 的对应关系如下:

- a. 对测量列的单项测量,按表 27;
- b. 对测量列的算术平均值,按表 28。

表 27

置信系数 t	置信水平 $(1-\alpha)$
1	0.6826
2	0.9544
3	0.9973

表 28 置信系数、置信水平与观测次数之间的对应关系
(供计算测量列算术平均值的极限误差时用)

t n	$1-\alpha$			t n	$1-\alpha$		
	0.9973	0.99	0.95		0.9973	0.99	0.95
2	3.0	3.0	3.0	16	3.0	2.95	2.13
3	3.0	3.0	3.0	17	3.0	2.92	2.12
4	3.0	3.0	3.0	18	3.0	2.90	2.11
5	3.0	3.0	2.78	19	3.0	2.88	2.10
6	3.0	3.0	2.57	20	3.0	2.86	2.09
7	3.0	3.0	2.45	30	3.0	2.75	2.05
8	3.0	3.0	2.36	40	3.0	2.70	2.02
9	3.0	3.0	2.31	50	3.0	2.68	2.01
10	3.0	3.0	2.26	60	3.0	2.66	2.00
11	3.0	3.0	2.23	70	3.0	2.65	1.99
12	3.0	3.0	2.20	80	3.0	2.64	1.99
13	3.0	3.0	2.18	90	3.0	2.63	1.99
14	3.0	3.0	2.16	100	3.0	2.63	1.98
15	3.0	2.98	2.14	∞	3.0	2.58	1.96

10.3.2.4 误差合成

测量某一参数时,如果存在 n 个随机误差(偏差)和 m 个未定系统误差,该量值的综合随机误差按式(78)计算:

$$\sigma_s = [\sum_{i=1}^n S_i^2]^{1/2} \quad \dots\dots\dots(78)$$

该量值的综合极限误差按式(79)计算:

$$\sigma_R = [\sum_{i=1}^n R_i^2 + \sum_{i=1}^m \Delta_i^2]^{1/2} \quad \dots\dots\dots(79)$$

式中: Δ ——未定系统误差。

10.3.2.5 测量值的总误差

测量值的总误差主要包括取样误差和测量误差,按式(80)计算:

$$\sigma = [\sigma_s^2 + \sigma_c^2]^{1/2} \quad \dots\dots\dots(80)$$

总极限误差按式(81)计算:

$$\sum \sigma_R = [\sigma^2 + \sigma_R^2]^{1/2} \quad \dots\dots\dots(81)$$

式中: σ 、 $\sum \sigma_R$ ——测量值的总误差和总极限误差;

σ_c ——取样误差;

σ_s 、 σ_R ——测量值的综合误差和综合极限误差。

10.4 间接测量中误差的传递计算公式

设: $y = F(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$, $\sigma_{y_1}, \sigma_{y_2}, \dots, \sigma_{y_n}$ 分别为测值自变数 x_1, x_2, \dots, x_n 的综合误差,当其偶然误差为正态分布时,误差传递计算公式如式(82)、式(83):

$$\sigma_y = \sqrt{\left(\frac{\partial y}{\partial x_1}\right)^2 \sigma_{y_1}^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial x_2}\right)^2 \sigma_{y_2}^2 + \dots + \left(\frac{\partial y}{\partial x_n}\right)^2 \sigma_{y_n}^2} \quad \dots\dots\dots(82)$$

$$\sigma_{\sigma_y} = \frac{\sigma_y}{y} \times 100 = \frac{\sqrt{\left(\frac{\partial y}{\partial x_1}\right)^2 \sigma_{y_1}^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial x_2}\right)^2 \sigma_{y_2}^2 + \dots + \left(\frac{\partial y}{\partial x_n}\right)^2 \sigma_{y_n}^2}}{y} \times 100 \quad \dots\dots\dots(83)$$

式中: σ_y 、 σ_{σ_y} ——测量值 y 的总误差和相对总误差;

y ——间接测量值;

x_1, x_2, \dots, x_n ——各个测量值。

注:按本规程给定的计算公式计算间接测量误差时,不考虑各个测量值的相关性和计算公式的不准确性及某些常数的不准确性给间接测量值带来的附加误差。

10.5 锅炉热效率计算中对测量误差的分析

10.5.1 在对锅炉试验的误差进行分析时,由测量误差在效率计算中引起的误差应按本章所提出的方法进行分析确定,测量误差中所包括的取样误差可由试验实际确定或经协商一致后估定。

10.5.2 列表 29 为除取样误差外各测量误差对锅炉热效率的影响。表中所列出的数据仅供参考。所列出的测量范围不具有权威性。

10.5.2 误差计算实例见附录 M(补充件)。

表 29 不同方法可能测量的误差、导致效率计算的误差 %

方法名称	序号	测量项目	测量误差	在计算锅炉效率中所导致的误差
输入—输出法	1	称重箱(经标定的磅秤)	±0.10	±0.10
	2	容积箱(经标定)	±0.25	±0.25
	3	经标定的流量喷嘴或孔板(包括压力计)	±0.35	±0.35
	4	经标定的流量喷嘴或孔板(包括记录仪)	±0.55	±0.55
	5	煤秤——次装炉量或堆料(经标定)	±0.25	±0.25
	6	未经校验的流量喷嘴或孔板(包括压力计)	±1.25	±1.25
	7	未经校验的流量喷嘴或孔板(包括记录仪)	±1.60	±1.60
	8	燃料的热值(煤)	±0.50	±0.50
	9	燃料的热值(气和油)	±0.35	±0.35
	10	再热汽流量(根据热平衡计算)	±0.60	±0.10
	11	过热器出口汽温(经标定的测量装置)	±0.25	±0.15
	12	过热器出口汽压(经标定的测量装置)	±1.00	±0.00
	13	再热器进口和出口汽温(经标定的测量装置)	±0.25	±0.10
	14	再热器进口和出口汽压(经标定的测量装置)	±0.50	±0.00
	15	给水温度(经标定的测量装置)	±0.25	±0.10
热损失法	1	发热量(煤)	±0.50	±0.30
	2	发热量(气和油)	±0.35	±0.02
	3	奥氏仪分析	±3.00	±0.30
	4	排烟温度(经标定的测量装置)	±0.50	±0.02
	5	进口空气温度(经标定的测量装置)	±0.50	±0.00
	6	煤的元素分析(碳)	±1.00	±0.10
	7	煤的元素分析(氢)	±1.00	±0.10
	8	燃料的水分	±1.00	±0.00

11 试验报告

锅炉机组试验报告与试验目的、内容及特定的要求有关。对于锅炉验收或鉴定性试验,通常包括总报告及技术报告。

11.1 试验总报告

试验总报告中应简要说明试验目的、主要数据与结论等,并由试验负责人签字,作为有关各方验收的依据。锅炉验收试验总报告格式见表 30。

11.2 试验技术报告

试验技术报告是针对某项试验详细的技术性总结,通常包括:

- a. 试验目的;
- b. 锅炉设备的技术特性、燃料特性、运行情况及必要的简图;
- c. 测试项目、方法与测点布置(必要时应附图);
- d. 试验数据整理。煤粉锅炉设计和试验结果综合表见表 31;
- e. 试验结果的分析与评价;

- f. 结论和建议;
- g. 测量技术及仪表的补充说明附件;
- h. 误差分析等其他附件。

表 30

锅炉验收试验总报告

试验编号 _____ 试验日期 _____ 至 _____
 电 厂 _____ 锅炉编号 _____
 申请试验单位 _____ 负责试验单位 _____

一、锅炉规范

型号 _____ 出厂年月 _____ 制造厂 _____
 额定蒸发量 _____ t/h; 最大连续蒸发量 _____ t/h;
 主蒸汽压力 _____ MPa; 再热蒸汽出口压力 _____ MPa;
 主蒸汽温度 _____ °C; 再热蒸汽出口温度 _____ °C;
 给水温度 _____ °C; 进风温度 _____ °C;
 燃烧方式 _____; 热风温度 _____ °C;
 制粉系统 _____; 排烟温度 _____ °C;
 锅炉保证效率 _____

二、燃料特性

种类 _____
 燃料工业分析: W^y : _____; V^y : _____; A^y : _____;
 燃料低位发热量 Q_{bw} : _____ kJ/kg

三、试验项目

- 1.
- 2.
- 3.
- 4.
- 5.
- 6.
- .
- .
- .

四、主要试验结果

热损失: q_2 : _____; q_3 : _____;
 q_4 : _____; q_5 : _____; q_6 : _____
 热损失法热效率:
 实测效率 η : _____;
 换算到保证条件下的效率 η' : _____;
 最大连续蒸发量: _____ t/h;
 最低稳定燃烧负荷: _____ t/h;

五、结论

- 1.
- 2.
- 3.
- .
- .
- .

试验负责人:(签字)
 年 月 日

表 31

名 称 试验工况序号 试验日期	符 号	单 位	设计值	试 验 数 据		
试验持续时间	τ	h				
一、燃料						
燃料种类						
应用基含碳量, %	C					
应用基含氢量, %	H					
应用基含硫量, %	S					
应用基含氮量, %	N					
应用基含氧量, %	O					
应用基水分, %	W					
应用基含灰量, %	A					
可燃基挥发分, %	V					
应用基低位发热量	Q_{60}	kJ/kg				
燃料灰分的熔融特性						
开始变形温度	t_1	°C				
开始软化温度	t_2	°C				
开始熔融温度	t_3	°C				
燃料特性系数	β	—				
煤的可磨度	K_{80}	—				
煤粉细度, %	R_{45} R_{90} R_{200} R_{300}	—				
煤粉颗粒特征均匀系数	n	—				
燃料温度	t_f	°C				
二、水和蒸汽						
锅炉蒸发量	D	t/h				
主蒸汽温度	t_{sa}	°C				
主蒸汽压力	p_{sa}	MPa				
给水流量	D_g	t/h				
给水温度	t_g	°C				
给水压力	p_g	MPa				
减温水流量	D_w	kg/h				
I级过热器减温水流量	D_{w-1}	kg/h				
II级过热器减温水流量	D_{w-2}	kg/h				
I级再热器减温水流量	D_{w-1}	kg/h				
II级再热器减温水流量	D_{w-2}	kg/h				
再热器减温水温度	t_{w-1}	°C				
再热器减温水压力	p_{w-1}	MPa				
再热蒸汽流量	D_m	t/h				
I级再热器进口蒸汽温度	t_{m-1}	°C				
II级再热器出口蒸汽温度	t_{m-2}	°C				
I级再热器进口蒸汽压力	p_{m-1}	MPa				
II级再热器出口蒸汽压力	p_{m-2}	MPa				
锅筒蒸汽压力	p_r	MPa				
排污水流量	D_{pw}	kg/h				
吹灰蒸汽流量	D_{ca}	kg/h				
省煤器进口水温	t_m	°C				
省煤器出口水温	$t_{m'}$	°C				

续表 31

名称 试验工况序号 试验日期	符号	单位	设计值	试验数据		
三、烟气						
排烟烟气分析						
氧含量, %	$(O_2)_{py}$					
三原子气体含量, %	$(RO_2)_{py}$					
一氧化碳含量, %	$(CO)_{py}$					
氢含量, %	$(H_2)_{py}$					
甲烷含量, %	$(CH_4)_{py}$					
碳氢化合物含量, %	$(C_nH_n)_{py}$					
实测排烟过量空气系数	α_{py}	—				
省煤器后烟气含氧量, %	$(O_2)_{sm}$					
省煤器后实测过量空气系数	α_{sm}	—				
空气预热器前烟气含 SO_2 量, %	$(RO_2)_{ky}$					
空气预热器后烟气含 RO_2 量, %	$(RO_2)_{ky}'$					
空气预热器漏风率, %	A_L					
炉膛出口烟温左侧/右侧	$\theta_{LT-1}/\theta_{LT-2}$	℃				
过热器出口烟温左侧/右侧	$\theta_{GR-1}/\theta_{GR-2}$	℃				
省煤器前烟温左侧/右侧	$\theta_{sm-1}/\theta_{sm-2}$	℃				
省煤器后烟温	θ_{sm}	℃				
排烟温度	θ_{py}	℃				
负压						
炉膛负压	P_{v-LT}	Pa				
过热器后负压	P_{v-GR}	Pa				
省煤器后负压	P_{v-sm}	Pa				
排烟负压	P_{v-py}	Pa				
阻力						
过热器烟气侧阻力	Δh_{GR}	Pa				
省煤器烟气侧阻力	Δh_{sm}	Pa				
空气预热器烟气侧阻力	Δh_{ky}	Pa				
烟道总阻力	Σh_{TD}	Pa				
四、空气						
送风机吸入空气温度(基准温度)	t_0	℃				
预热器前空气温度	t_y	℃				
预热器后空气温度	$t_{y'}$	℃				
一次风温度	t_1	℃				
进入空气预热器风量	V_{SF}	m^3/h				
燃烧器前或总风箱内一次风静压	h_{s-1}	Pa				
燃烧器前或总风箱内二次风静压	h_{s-2}	Pa				
乏气燃烧器前乏气静压	h_{s-3}	Pa				
燃烧器一次风量	V_1	m^3/h				
燃烧器二次风量	V_2	m^3/h				
乏气风量	V_3	m^3/h				
燃烧器一次风速	w_1	m/s				
燃烧器二次风速	w_2	m/s				
燃烧器乏气风速	w_3	m/s				
五、灰、渣特性						
炉渣中灰量占总灰量质量百分率, %	a_L					
飞灰中灰量占总灰量质量百分率, %	a_{fh}					

续表 31

名 称	符 号	单 位	设计值	试 验 数 据		
试验工况序号						
试 验 日 期						
沉降灰中灰量占总灰量质量百分率, %						
漏煤中灰量占总灰量质量百分率, %						
炉渣可燃物含量, %	a_{ca}					
飞灰可燃物含量, %	a_{ca}					
沉降灰可燃物含量, %	C_L					
漏煤可燃物含量, %	C_h					
炉渣温度	C_{sp}	℃				
沉降灰温度	C_m	℃				
六、热平衡与炉膛热强度						
排烟热损失百分率, %						
可燃气体未完全燃烧热损失百分率, %						
固体未完全燃烧热损失百分率, %	q_2					
锅炉散热损失百分率, %	q_3					
灰渣物理热损失百分率, %	q_4					
锅炉热效率(毛效率), %	q_5					
换算到担保值条件下的热效率, %	q_6					
锅炉每小时燃料耗量	η	kg/h				
炉膛容积热负荷	η'	$\times 10^3 \text{kJ} / (\text{m}^3 \cdot \text{h})$				
炉膛截面热负荷	B	$\times 10^3 \text{kJ} / (\text{m}^2 \cdot \text{h})$				
	q_7					
七、锅炉辅机消耗功率						
制粉系统						
磨煤机	P_{Mx}	kW				
给煤机	P_{OM}	kW				
排粉机(或一次风机)	P_{FF}	kW				
密封风机	P_{LS}	kW				
捞渣机消耗功率	P_{LZ}	kW				
送风机消耗功率	P_{SF}	kW				
引风机消耗功率	P_{YF}	kW				
炉水循环水泵消耗功率	P_w	kW				
其他辅机消耗功率	P_i	kW				
锅炉辅机消耗总功率	ΣP	kW				
八、锅炉净效率						
电厂发电标准煤耗	b	kg/(kW·h)				
锅炉自用热耗	Q_{zy}	kJ/kg				
锅炉净效率, %	η_n					

附录 A
常用法定计量单位及其换算
(参考件)

表 A1

序号	量的名称	法定单位		换 算 或 说 明
		名 称	符 号	
1	时间	秒 分 (小)时 天(日) 年	s min h d a	SI 基本单位 非 SI 的法定单位 1min=60s 1h=60min=3600s 1d=24h=86400s
2	长度	米 分米 厘米 毫米 微米 纳米 千米、公里	m dm cm mm μ m nm km	SI 基本单位 1dm=1/10 m 1cm=1/100 m 1mm=1/1000 m 1 μ m=1/1000 mm 1nm=10 ⁻⁹ mm 公里为我国习用法定单位。1公里=1000m 1in(英寸)=25.4mm 1ft(英尺)=12in=30.48cm 1yd(码)=3ft=0.9144m
3	面积	平方米	m ²	SI 导出单位 1ft ² =0.0929m ² 1in ² =6.4516×10 ⁻⁴ m ²
4	体积 容积	立方米 升 立方厘米	m ³ L cm ³	SI 导出单位 非 SI 的法定单位 1L=1dm ³ =10 ⁻³ m ³ SI 导出单位 1cm ³ =10 ⁻³ L 1cc=1cm ³ =10 ⁻³ L 1ft ³ =2.832×10 ⁻² m ³ =28.32L 1in ³ =1.6387×10 ⁻⁶ m ³ =1.6387×10 ⁻² L
5	质量	千克 吨 克	kg t g	SI 基本单位 非 SI 法定单位 1t=1000 kg SI 导出单位 1g=1/1000 kg 1lb(磅)=0.45359237kg
6	力、重力	牛(顿) 千牛[顿]	N kN	SI 导出单位 1kN=1000N 1kgf(公斤力)=9.80665N 1lbf(磅力)=4.448N

续表 A1

序号	量的名称	法定单位		换算或说明
		名称	符号	
7	压力、 压强、 应力	帕[斯卡]	Pa	SI 导出单位 N/m ²
				1kgf/m ² =9.80665Pa 1kgf/cm ² =9.80665×10 ⁴ Pa=0.0980665MPa 1kgf/mm ² =9.80665MPa 1bar=10 ⁵ Pa 1mmHg=133.322Pa 1mmH ₂ O=9.80665Pa 1Torr=133.322Pa 1atm(标准大气压)=101325Pa 1at(工程大气压)=98066.5Pa 1lbf/ft ² (磅力/英尺 ²)=47.8803Pa 1lbf/in ² (磅力/英寸 ²)=6894.76Pa
8	能、 功、热	焦[耳] 千瓦小时	J kW·h	SI 导出单位 N·m 1kW·h=3.6×10 ⁶ J
				1kgf·m=9.80665J 1kcal=4.1868J 1ft·lbf(英尺磅力)=1.35582J 1BTU(英热单位)=1055J
9	功率	瓦特 千瓦	W kW	SI 导出单位 J/s 1千瓦=1kW=1000W
				1kgf·m/s=9.80665W 1ft·lbf/s(英尺磅力每秒)=1.35582W 1cal/s=4.1868W 1BTU/s(英热单位每秒)=1055W
10	速度、 流速、 风速	米每秒	m/s	SI 导出单位
				1in/s=0.0254m/s 1ft/s=0.3048m/s
11	加速度	米每二次方秒	m/s ²	SI 导出单位
				1g _n (标准重力加速度)=9.80665m/s ²
12	流量	立方米每小时 升每分钟	m ³ /h L/min	法定计量单位导出单位 法定计量单位导出单位 1L/min=0.06000m ³ /h
				1ft ³ /h=0.028317m ³ /h=0.47194L/min 1cfs(ft ³ /s)=7.87×10 ⁻⁴ m ³ /min=1.31×10 ⁻⁴ L/s 1cfm(ft ³ /min)=4.72×10 ⁻⁴ m ³ /min=7.87×10 ⁻⁵ L/s
13	温度	开[尔文] 摄氏度	K (SI 基本单位 非 SI 的法定单位 0℃=273.15K; Δ1℃=Δ1K
				T(华氏度)= $\frac{5}{9}(\text{°F}-32)+\text{°C}$; Δ1°F=0.555556K

续表 A1

序号	量的名称	法定单位		换算或说明
		名称	符号	
14	密度	千克每立方米	kg/m ³	SI 导出单位
				1lb/ft ³ (磅每立方英尺)=16.018kg/m ³
15	发热量	焦耳每千克	J/kg	SI 导出单位
				1kcal/kg=4187J/kg 1BTU/lb(英热单位每磅)=2326.13J/kg
16	容积热强度	瓦特每立方米	W/m ³	SI 导出单位
				1kcal/(m ³ ·h)=1.163W/m ³ 1BTU/(ft ³ ·h)=10.347W/m ³
17	面积热强度	瓦特每平方米	W/m ²	SI 导出单位
				1kcal/(m ² ·h)=1.163W/m ² 1BTU/(ft ² ·h)=3.154W/m ²
18	比热	焦耳每千克开(尔文)	J/(kg·K)	法定计量单位导出单位
				1kcal/(kg·°C)=4187J/(kg·K) 1BTU/(lb·°F)=1kcal/(kg·°C)=4187J/(kg·K)
19	浓度	克每升	g/L	法定计量单位导出单位
		毫克每升	mg/L	法定计量单位导出单位 1g/L=1kg/m ³
		毫克每立方米	mg/m ³	法定计量单位导出单位 ppm 与 mg/m ³ 的换算与物质的分子量有关。详见附录 B
20	传热系数	瓦特每平方米开[尔文]	W/(m ² ·K)	SI 导出单位
				1kcal/(m ² ·h·°C)=1.163W/(m ² ·K) 1BTU/(ft ² ·h·°F)=4.882kcal/(m ² ·h·°C)=5.678W/(m ² ·K)
21	热导率 (导热系数)	瓦特每米开[尔文]	W/(m·K)	SI 导出单位
				1kcal/(m·h·°C)=1.163W/(m·K) 1BTU/(ft·h·°F)=1.488kcal/(m·h·°C)=1.7307W/(m·K)

附录 B
各种气体浓度的 ppm 与 mg/m³ 换算
(参考件)

序 号	成 分	分 子 量	1ppm 换算成 mg/m ³	1mg/m ³ 换算成 ppm
1	氢(H ₂)	2	0.0893	11.2000
2	甲烷(CH ₄)	16	0.7140	1.4000
3	一氧化碳(CO)	28	1.2500	0.8000
4	氮气(N ₂)	28	1.2500	0.8000
5	氧气(O ₂)	32	1.4290	0.7000
6	硫化氢(H ₂ S)	34	1.5180	0.6590
7	一氧化氮(NO)	30	1.3390	0.7470
8	二氧化碳(CO ₂)	44	1.9640	0.5190
9	二氧化氮(NO ₂)	46	2.0540	0.4870
10	二氧化硫(SO ₂)	64	2.8600	0.3500
11	三氧化硫(SO ₃)	80	3.5700	0.2800

附录 C
常用气体及灰的特性
(补充件)

C 1 空气和烟气及灰的平均定压比热见表 C1。

表 C1 空气和烟气及灰的平均定压比热 $\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$

θ ($^{\circ}\text{C}$)	C_{p,CO_2} kJ/ ($\text{m}^3 \cdot ^{\circ}\text{C}$)	C_{p,N_2} kJ/ ($\text{m}^3 \cdot ^{\circ}\text{C}$)	C_{p,O_2} kJ/ ($\text{m}^3 \cdot ^{\circ}\text{C}$)	$C_{p,\text{H}_2\text{O}}$ kJ/ ($\text{m}^3 \cdot ^{\circ}\text{C}$)	$C_{p,\text{灰}}$ kJ/ ($\text{m}^3 \cdot ^{\circ}\text{C}$)	$C_{p,\text{A}}$ kJ/ ($\text{m}^3 \cdot ^{\circ}\text{C}$)	$C_{p,\text{CO}}$ kJ/ ($\text{m}^3 \cdot ^{\circ}\text{C}$)	C_{p,H_2} kJ/ ($\text{m}^3 \cdot ^{\circ}\text{C}$)	C_{p,CH_4} kJ/ ($\text{m}^3 \cdot ^{\circ}\text{C}$)	C_{p,C_x} kJ/ ($\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C}$)
0	1.5998	1.2946	1.3059	1.4943	1.2971	1.3188	1.2992	1.2766	1.5500	0
100	1.7903	1.2958	1.3176	1.5052	1.3004	1.3243	1.3017	1.2908	1.6411	0.7955
200	1.7873	1.2996	1.3352	1.5223	1.3071	1.3318	1.3071	1.2971	1.7589	0.8374
300	1.8627	1.3067	1.3561	1.5424	1.3172	1.3423	1.3167	1.2992	1.8861	0.8667
400	1.9297	1.3163	1.3775	1.5654	1.3289	1.3544	1.3289	1.3021	2.0155	0.8918
500	1.9887	1.3276	1.3980	1.5897	1.3427	1.3683	1.3427	1.3050	2.1403	0.9211
600	2.0411	1.3402	1.4168	1.6148	1.3565	1.3829	1.3574	1.3080	2.2609	0.9240
700	2.0884	1.3536	1.4344	1.6412	1.3708	1.3976	1.3720	1.3121	2.3768	0.9504
800	2.1311	1.3670	1.4499	1.6680	1.3842	1.4114	1.3862	1.3167	2.4981	0.9630
900	2.1692	1.3795	1.4645	1.6956	1.3976	1.4248	1.3996	1.3226	2.6025	0.9797
1000	2.2035	1.3917	1.4775	1.7229	1.4097	1.4373	1.4126	1.3289	2.6992	1.0048
1100	2.2349	1.4034	1.4893	1.7501	1.4214	1.4499				1.0258
1200	2.2638	1.4143	1.5005	1.7769	1.4327	1.4612	1.4361	1.3431	2.8629	1.0509
1300	2.2898	1.4252	1.5106	1.8028	1.4432	1.4725				1.0969
1400	2.3136	1.4348	1.5202	1.8280	1.4528	1.4830	1.4566	1.3590		1.1304
1500	2.3354	1.4440	1.5294	1.8527	1.4620	1.4926				1.1849
1600	2.3555	1.4528	1.5378	1.8761	1.4708	1.5018	1.4746	1.3754		1.2228
1700	2.3743	1.4612	1.5462	1.8996	1.4788	1.5102				1.2979
1800	2.3915	1.4687	1.5541	1.9213	1.4867	1.5177	1.4901	1.3917		1.3398
1900	2.4074	1.4759	1.5617	1.9423	1.4939	1.5257				1.3816
2000	2.4221	1.4825	1.5692	1.9628	1.5010	1.5328	1.5039	1.4076		1.4235
2100	2.4359	1.4893	1.5759	1.9825	1.5073	1.5399				
2200	2.4484	1.4951	1.5830	2.0009	1.5135	1.5462	1.5160	1.4227		
2300	2.4602	1.5010	1.5897	2.0189	1.5194	1.5525				
2400	2.4710	1.5064	1.5964	2.0364	1.5252	1.5583	1.5340	1.4373		
2500	2.4811	1.5114	1.6027	2.0528	1.5303	1.5638				

C 2 常用气体的定压比计算公式(适用于 $0 \sim 500^{\circ}\text{C}$ 时)见式(C1)~(C4):

$$C_{p,\text{N}_2} = 1.29465 + 7.31852 \times 10^{-5}\theta_{py} + 1.79523 \times 10^{-7}\theta_{py}^2 - 6.38890 \times 10^{-10}\theta_{py}^3 \dots\dots(C1)$$

$$C_{p,\text{O}_2} = 1.30586 + 8.22434 \times 10^{-5}\theta_{py} + 4.00158 \times 10^{-7}\theta_{py}^2 - 3.92592 \times 10^{-10}\theta_{py}^3 \dots\dots(C2)$$

$$C_{p,\text{CO}} = 1.29929 - 8.66407 \times 10^{-7}\theta_{py} + 2.27936 \times 10^{-7}\theta_{py}^2 - 1.04629 \times 10^{-10}\theta_{py}^3 \dots\dots(C3)$$

$$C_{p,\text{CO}_2} = 1.59981 + 1.07732 \times 10^{-4}\theta_{py} - 7.70675 \times 10^{-7}\theta_{py}^2 + 3.43519 \times 10^{-10}\theta_{py}^3 \dots\dots(C4)$$

式中, θ_{py} —— 排烟温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

$C_{p,\text{N}_2}, C_{p,\text{O}_2}, C_{p,\text{CO}}, C_{p,\text{CO}_2}$ —— 相应各常用气体的定压比热, $\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$ 。

C 3 气体燃料成分中的气体特性见表 C2。

表 C2

气体名称	符 号	密 度 ρ kJ/m ³	低位发热量 Q_{bw} MJ/m ³
氢	H ₂	0.090	10.798
氮(元素的)	N ₂	1.251	—
空气氮(有氮的混合物)	N ₂	1.257	—
氧	O ₂	1.428	—
一氧化碳	CO	1.250	12.636
二氧化碳	CO ₂	1.964	—
二氧化硫	SO ₂	2.858	—
硫化氢	H ₂ S	1.520	23.383
甲 烷	CH ₄	0.716	35.818
乙 烷	C ₂ H ₆	1.342	63.748
丙 烷	C ₃ H ₈	1.967	91.251
丁 烷	C ₄ H ₁₀	2.593	118.646
戊 烷	C ₅ H ₁₂	3.218	146.077
乙 烯	C ₂ H ₄	1.251	59.063
丙 烯	C ₃ H ₆	1.877	86.001
丁 烯	C ₄ H ₈	2.503	113.508
苯	C ₆ H ₆	3.485	140.375

附 录 D
煤、灰的比热
(补充件)

D1 煤、灰比热的估算公式

煤的比热按式(D1)计算,灰的比热按式(D2)计算:

$$C_r = C_r^* \times \frac{100 - W^y}{100} + 4.1868 \frac{W^y}{100} \dots\dots\dots(D1)$$

$$C_h = 0.71 + 5.02 \times 10^{-4} t_h \dots\dots\dots(D2)$$

式中: C_r —— 燃料(煤)的比热, kJ/(kg · K);
 C_r^* —— 煤的干燥基比热, kJ/(kg · K);
按式(D3)计算:

$$C_r^* = 0.01 [C_h A^s + C^*(100 - A^s)] \dots\dots\dots(D3)$$

式中: C^* —— 可燃物质比热, kJ/(kg · K);
按式(D4)计算:

$$C^* = 0.84 + 37.68 \times 10^{-5} (13 + V^r)(130 + t_r) \dots\dots\dots(D4)$$

式中: V^r —— 煤的可燃基挥发分, %;
 t_r —— 煤的温度, °C;
 C_h —— 灰的比热, kJ/(kg · K);
 A^s —— 煤的干燥基灰分, %;
 W^y —— 煤的应用基水分, %;
 t_h —— 灰的温度, °C。

附录 E
锅炉灰渣平衡百分率
(补充件)

燃烧方式与炉膛型式		捕渣率 %	飞灰平衡百分率 %
链条炉		—	15~30
抛煤炉			25~40
沸腾炉		—	40~60
固态排渣火室炉	钢球或中速磨煤机	—	~90 ¹⁾
	竖井磨煤机		~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	
立式下置旋风炉(KSG型)	褐煤	80~85	—

注:1) 其中省煤器下部沉降灰3%,空气预热器下部沉降灰5%。

附录 F
 额定负荷下锅炉散热损失
 (补充件)

F 1 锅炉额定负荷下的散热损失按图 F1 曲线查取。

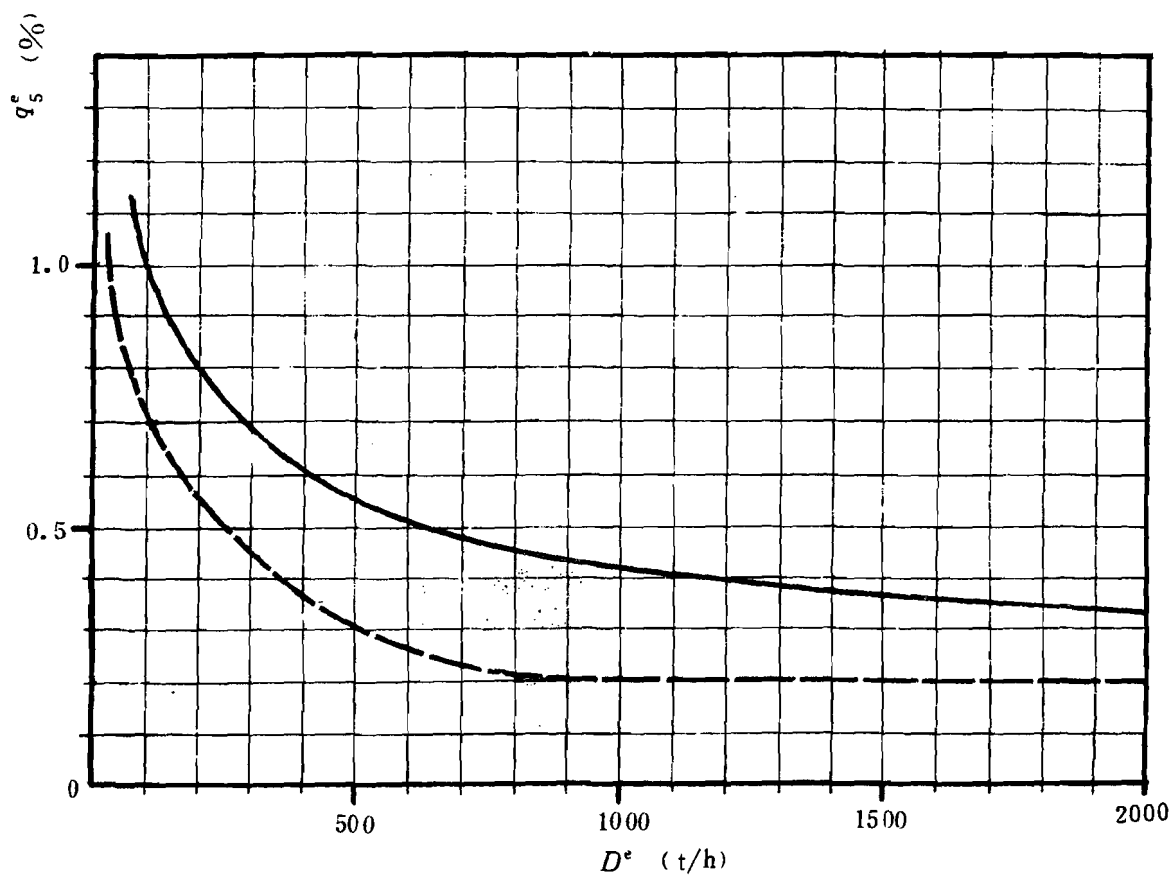


图 F1 额定负荷下的锅炉散热损失曲线
 (虚线仅供考核锅炉本体设计热效率)

F 2 锅炉机组额定负荷下的散热损失也可按式(F1)计算:

$$q_s^e = 5.82(D^e)^{-0.38} \dots\dots\dots(F1)$$

式中: q_s^e —— 锅炉机组额定负荷下的散热损失, %;

D^e —— 锅炉额定负荷(蒸发量), t/h。

附录 G
湿空气线算图
(补充件)

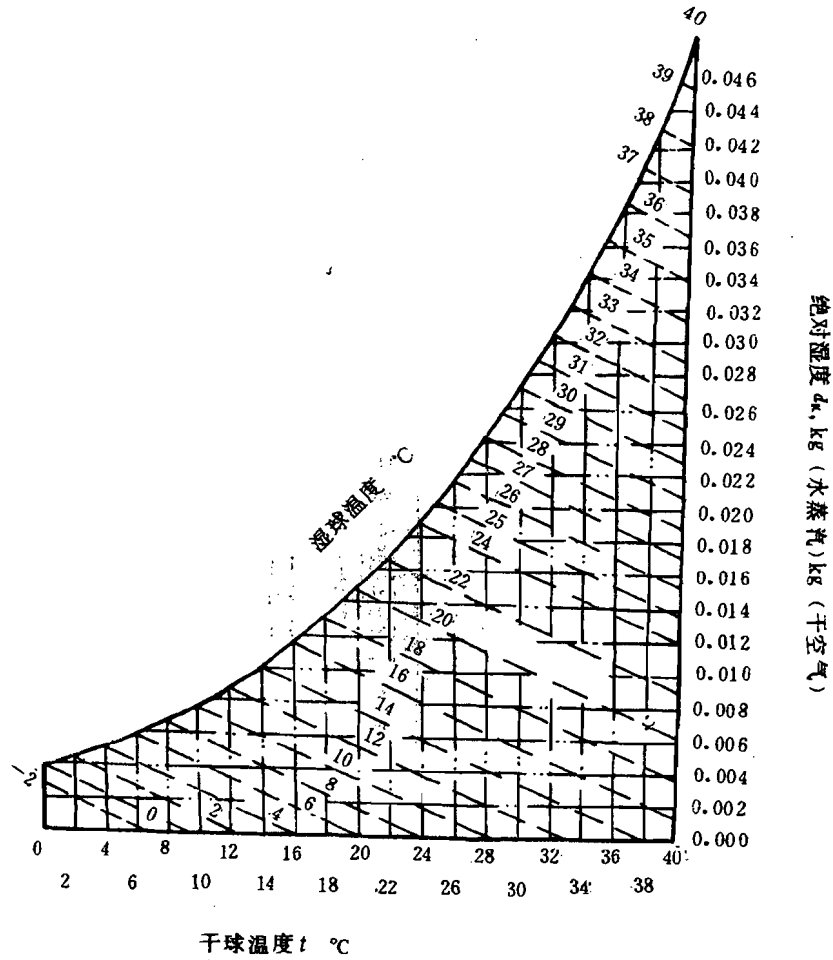


图 G1 空气的绝对湿度

附录 H
网格法等截面的划分原则及代表点的确定
(补充件)

H 1 圆形截面

H 1.1 将圆形截面划分为 N 个等面积的同圆心圆环,再将每个圆环分成相等面积的两部分。测点即位于新分成的两个同心圆环的分界线上(见图 H1)。

测点距圆形截面中心的位置按式(H1)求得:

$$r_i = R \times \sqrt{\frac{2i-1}{2N}} \dots\dots\dots(H1)$$

式中: r_i ——测点距圆形截面中心的距离,mm;

R ——圆形截面半径,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。

H 1.2 当截面直径 D 不超过 400mm,可在一条直线上测量(即图 H1 中的 I—I 或 II—II 直径);若直径 D 大于 400mm,则应在相互垂直的两条直径上测量(即同时在图 H1 中的 I—I 和 II—II 上布置测点)。

H 1.3 圆形截面直径 D 与划分圆环数 N 的规定见表 H1。

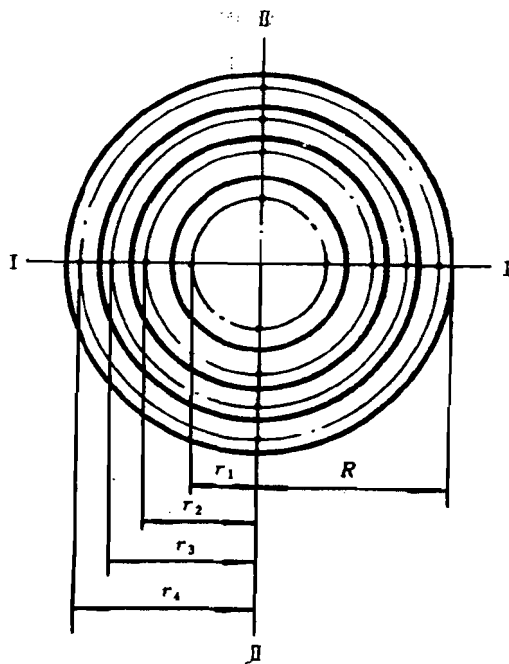


图 H1 圆形截面测点分布示意图

表 H1

管道直径 D mm	300	400	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	测点数增加 4

H 2 矩形截面

H 2.1 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 H2)。

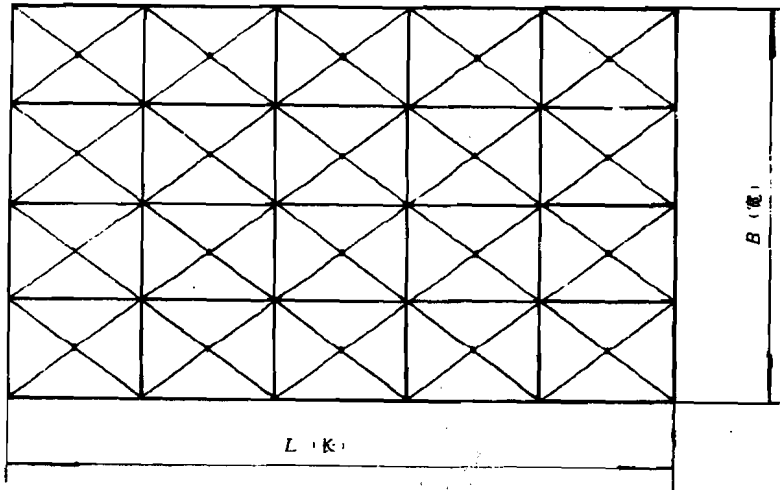


图 H2 矩形截面测点分布示意图

H 2.2 矩形截面边长 L (或 B) 与测点排数 N 的规定见表 H2。

表 H2

边长 L mm	≤ 500	500~1000	$> 1000 \sim 1500$	> 1500
测点排数 N	3	4	5	L 每增长 500 测点排数 N 增加 1

H 2.3 对较大的矩形截面, 可适当减少 N 值, 但每个小矩形的边长应不超过 1m。

H 3 代表点测量法

H 3.1 代表点的确定方法

H 3.1.1 代表点的确定在预备性试验或正式试验开始前进行。

H 3.1.2 按上述等截面划分方式确定测点, 并在各点位置上测量速度及被测参数 (如温度、烟气成分、可燃物浓度等), 并按式 (H2) 求得该参数的速度加权平均值。

$$X_{pj} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i X_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \dots\dots\dots (H2)$$

式中: X_{pj} ——被测参数的速度加权平均值;

X_i ——各测点的被测参数实测值;

w_i ——截面各测点的实测流速, m/s。

H 3.1.3 在测量截面内找出与 X_{pj} 值相等的测点, 该点即为代表点。

H 3.2 代表点修正系数的确定

H 3.2.1 若按 H3.1 法不能找得与 X_D 相等的测点时,可选取与 X_D 相近的实测值 X_D 测点作为代表点,并按式(H3)求得该点的修正系数 K :

$$K = \frac{X_D}{X_D} \dots\dots\dots (H3)$$

此时,试验时测量截面修正后的代表点测量值 X 按式(H4)求得:

$$X = KX_D \dots\dots\dots (H4)$$

式中: X ——测量截面修正后的代表点测量值;

X_D ——试验代表点的实测值;

K ——代表点被测参数的修正系数。

H 3.3 对比较小的管道或流速场较均匀的截面,可以在一个测量面内取一个代表点,对于截面较大的管道,应采用多代表点测量法。

H 4 多代表点测量法

对于截面较大的管道,将整个测量截面按速度场及被测参数分布场或按测孔布置情况,将截面划分为多个测量区。在每个测量区内,按 H3.1 或 H3.2 条确定一个被测参数的代表点进行多代表点测量。此时,整个截面的测量值为各代表点被测参数算术平均值,即:

$$X = \frac{\sum_{i=1}^N K_i X_{Di}}{N} \dots\dots\dots (H5)$$

式中: X ——整个截面测量值;

X_{Di} ——各代表点实测值;

K_i ——各测量区内被测参数的修正系数,按式(H3)求得;

N ——代表点数量,即测量区数量。

附录 I
流量测量节流装置中差压传送管路的布设
(补充件)

I 1 传压管

I 1.1 传压管长度与最小内径见表 I1 的规定。

表 I1

传压管长度 m	传压管最小内径 mm
<7.5	6
7.5~16	7~9
>16~45	10
>45~90	13

I 1.2 传压管应垂直或倾斜敷设(除从节流件处引出的一小段外),其倾斜度不得小于 1:12。当水平方向传送距离超过 30m 时,传压管应分段倾斜,并在各最高点和最低点分别装设带有排汽阀的集气器和带有排污阀的沉降器。

I 1.3 为避免差压信号传送失真,正、负压传压管应尽量靠近敷设,且应尽量减少外部热源的影响。严寒地区还应对传压管加防冻设施,当用电或蒸汽加热保温时要防止过热。

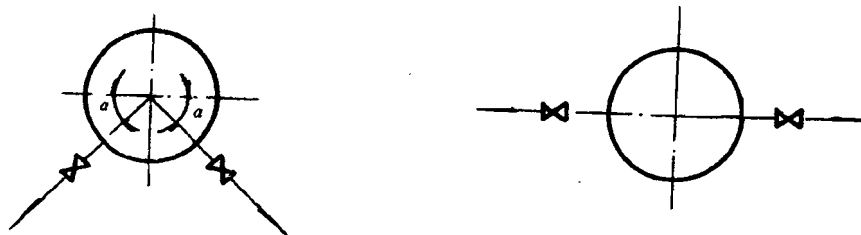
I-2 取压孔

I 2.1 节流件环室上取压孔位置的确定应满足下列条件:

- a. 被测流体为水时,能防止气体进入传压管;
- b. 被测流体为气体时,能防止水和脏物进入传压管。

I 2.2 当装有节流装置的主管道为垂直时,取压孔位置可在取压装置的平面上任意选择。

I 2.3 当主管道为水平或倾斜时,取压孔的位置按图 I1 所示。

a 被测流体为液体时, $\alpha \leq 45^\circ$

b 被测流体为水蒸气时

图 I1 在水平或倾斜管道上取压孔位置示意图

I 3 截断阀

I 3.1 在靠近节流件的传压管路上应装设截断阀。如截断阀本身没有单独的支架,则其位置应尽量靠近主管道,避免在开闭阀门时使传压管与环室的焊缝根部受过大力矩而受损。

- I 3.2 当传压管上装有冷凝器且冷凝位置靠近节流件时,截断阀可装在从冷凝器引出的传压管上。
- I 3.3 截断阀流通面积应不少于传压管的流通面积。截断阀的结构应能防止在其本体中聚积气体或液体。建议采用直孔式截断阀。

I 4 冷凝器

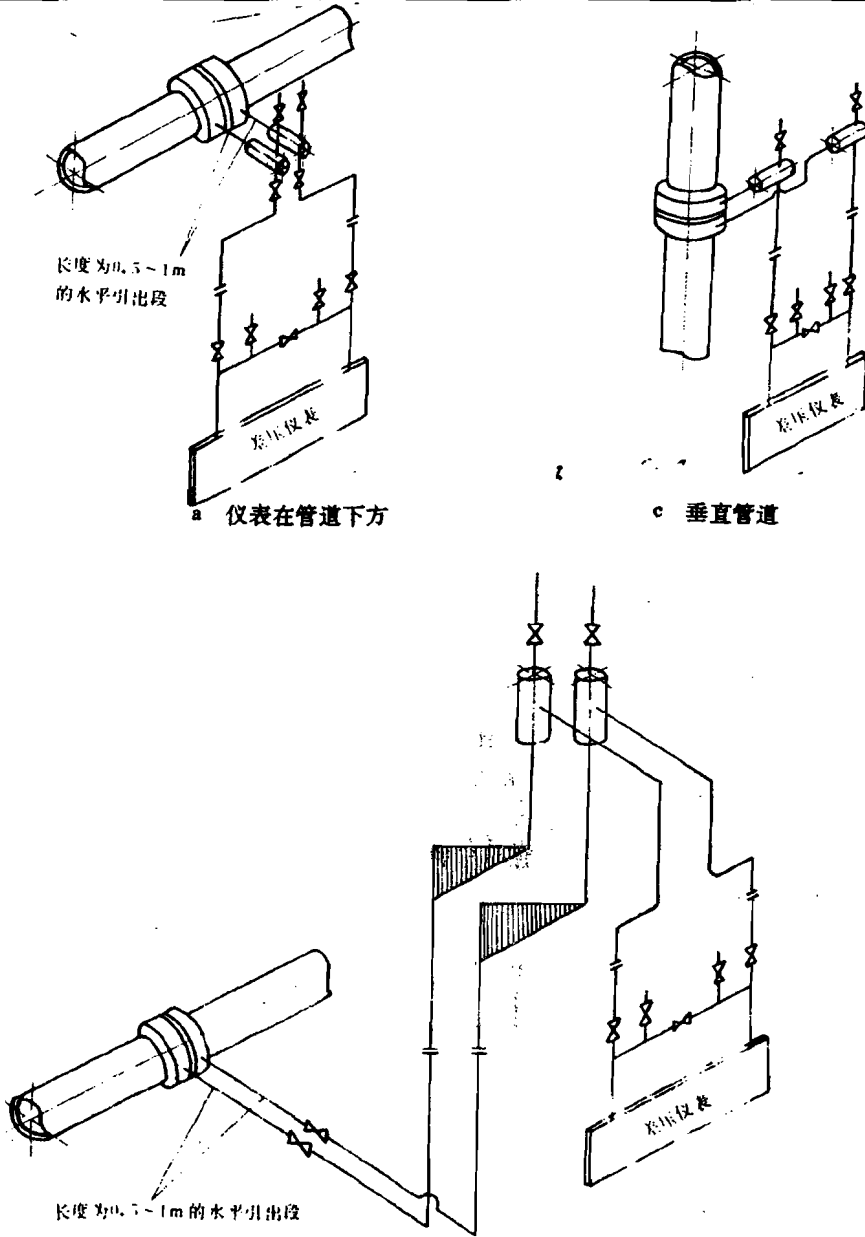
- I 4.1 在蒸汽流量测量装置的传压管路上装设冷凝器,其作用为使传压管内的蒸汽冷凝,并使正、负传压管中的冷凝液面有相同高度和保持恒定。
- I 4.2 冷凝器的容积应大于全量程内差压计或差压变送器工作空间最大容积变化量的三倍。
- I 4.3 冷凝器的水平方向横截面积不得小于差压计或差压变送器的工作面积,以便可忽略由于冷凝器中冷凝液面波动而产生的附加误差。
- I 4.4 节流件与冷凝器相接的传压管内径应足够大,以免形成水栓。
- I 4.5 对于高温、高压蒸汽(蒸汽压力不低于 20MPa,且蒸汽温度不低于 400℃),在节流件和冷凝器之间应装设冷凝水捕集器,以防流量波动很大时,因冷凝水返回主管道并使节流件变形。

I 5 集气器、排汽阀、沉降器和排污阀

- I 5.1 当被测流体为液体、且传压管始段为向上引出时,在传压管的各最高点上应装设集气器和排气阀,以收集和定期排出传压管中的气体。当差压计或差压变送器的位置高于主管道时,尤应注意设置集气器或排气阀。
- I 5.2 传压管路中的最低点应装设沉降器和排污阀,以收集和定期排出传压管路中的污物(当被测流体为水时)和积水(当被测流体为蒸汽时)。

I 6 传压管的安装方式(典型)

- I 6.1 测量水流量的传压管安装示意图见图 I2。
- I 6.2 测量蒸汽流量的传压管安装示意图见图 I3。



b. 水平管道, 差压仪表在主管道上方
 图 12 测量水流量的传压管路安装示意图

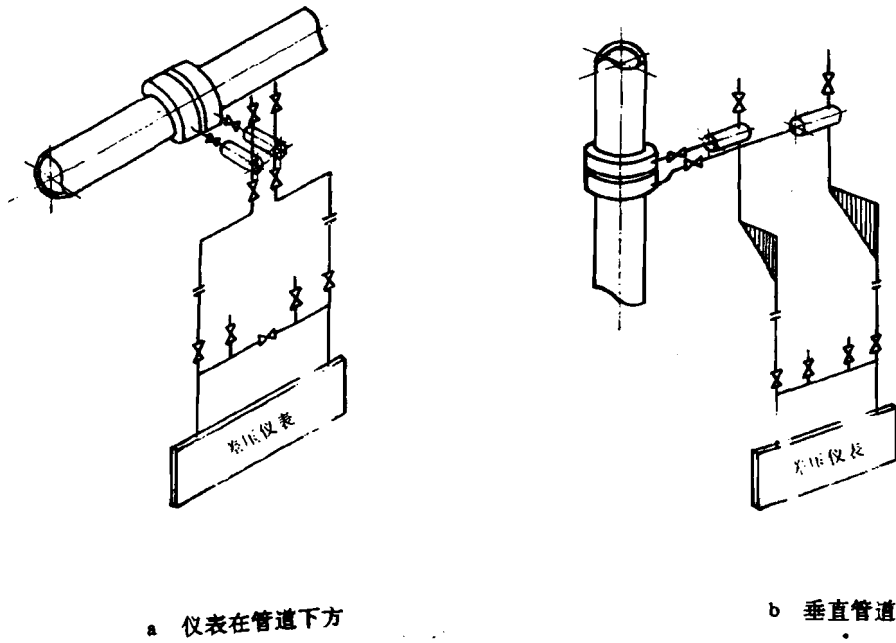


图 13 测量蒸汽流量的传压管安装示意图

附录 J

弹簧管压力计读数修正及液柱式压力计常用封液和使用
(补充件)

J 1 弹簧管压力计环境温度与传压管液柱对表计读数的修正

J 1.1 当压力计周围环境温度超过 40℃时,应按式(J1)对表计读数进行修正(适用于在 15~25℃范围内分度或校验的压力表):

$$p' = \frac{p}{0.99 + 0.0004t} \dots\dots\dots(J1)$$

式中: p' ——修正后的压力计读数, Pa;
 p ——压力计读数, Pa;
 t ——压力计周围环境温度, ℃。

J 1.2 当压力计中心标高与测点标高之差值为 H 时,按式(J2)修正:

$$p' = p + \Delta p = p + 9.81H\rho \dots\dots\dots(J2)$$

式中: p' ——修正后的压力计读数, Pa;
 p ——压力计读数, Pa;
 H ——压力计中心标高与测点标高之差值, m;
 Δp ——传压管液柱垂直高度面形成之附加压力, Pa;
 ρ ——传压管内工质平均密度, kg/m³。

J 2 液柱式压力计

J 2.1 采用液柱式压力计时,要根据被测压力的上限和被测工质的性质合理选用压力计用封液。表 J1 列出为液柱式压力计常用封液及其性质。

表 J1

封液名称	化学符号	有无毒性	密度 ρ kg/m ³ (20℃时)	体膨胀系数 β 1/℃ (20℃时)
汞	Hg	有	13545.7	18.2×10 ⁻⁵
水	H ₂ O	无	998.2	20.0×10 ⁻⁵
酒精	C ₂ H ₅ OH	无	789.2	112×10 ⁻⁶
四氯化碳	CCl ₄	有	1594.0	124×10 ⁻⁵
三溴甲烷	CH ₂ Br ₃	有	2890.0	90×10 ⁻⁵

注:单质封液应满足化学纯的要求,若是混合剂,则应保证规定的比例。

J 2.2 U型管压力计所选用的封液密度越小,仪表的灵敏度越高。在确定液柱高度时,同时读出两管的液面高度,可减少测量误差。

J 2.3 倾斜管式微压计常用酒精(染色)作封液,并用改变倾斜角度(一般不小于 15°~20°)来适应不同的测量范围。

J 2.4 注意事项

- a. 被测压力不能超过仪表测量范围;

- b. 被测工质不能与封液混合或起化学反应；
- c. 安装部位应避开过热、过冷和有振动的地方；
- d. 读数时，视线应与液面相平；观测水、酒精液面时，应以凹面为准；观测水银面时应以凸面为准；
- e. 倾斜管微压计测量前应先校验水平，再校正仪表的零点；
- f. 灌注封液的密度应与仪表刻度标尺的液体密度一致；
- g. 经常检查仪表和连接管间是否有泄漏现象并予以消除。

附录 K
空气预热器漏风率的测定与计算
(补充件)

K 1 定义和公式

空气预热器漏风率,为漏入空气预热器烟气侧的空气质量与进入该烟道的烟气质量之比。漏风率按式(K1)计算:

$$A_L = \frac{\Delta m_k}{m_y} \times 100 = \frac{m_y' - m_y''}{m_y''} \times 100 \quad \text{.....(K1)}$$

式(K1)可改写为:

$$A_L = \frac{m_k' - m_k''}{m_y''} \times 100 \quad \text{.....(K2)}$$

式中: A_L ——漏风率, %;

m_y', m_y'' ——分别为烟道进、出口处烟气质量, mg/kg, mg/m³;

Δm_k ——漏入空气预热器烟气侧的空气质量, mg/kg, mg/m³;

m_k', m_k'' ——分别为空气预热器进、出口空气质量, mg/kg, mg/m³。

K 2 漏风率测定

同时测定相应烟道进、出口烟气的三原子气体(RO_2)体积含量百分率,并按经验公式(K3)计算:

$$A_L = \frac{RO_2' - RO_2''}{RO_2''} \times 90 \quad \text{.....(K3)}$$

式中: RO_2', RO_2'' ——相应烟道反段进、出口烟气三原子气体(RO_2)体积含量百分率, %。

K 3 漏风率与漏风系数的换算

漏风率与漏风系数按式(K4)进行换算:

$$A_L = \frac{\alpha'' - \alpha'}{\alpha'} \times 90 \quad \text{.....(K4)}$$

式中: α', α'' ——分别为烟道进、出口处烟气过量空气系数。

可按本标准式(47)计算。

附录 L
疏失误差的消除方法
(参考件)

L 1 用统计法剔除疏失误差的格拉布斯(Grubbs)法

L 1.1 将实验数据按其大小进行排列,计算算术平均值 \bar{x} 和标准偏差

$$S = \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right]^{0.5} \dots\dots\dots(L1)$$

L 1.2 选定检出水平 α ,一般选 α 为 0.05 或 0.01。

L 1.3 对于观测值 x_1, x_2, \dots, x_n 计算统计量 G_n , 求出最大和最小统计量 G_n^{\max} 和 G_n^{\min} :

$$G_n = (x_n - \bar{x})/S \dots\dots\dots(L2)$$

$$G_n^{\max} = (x_n^{\max} - \bar{x})/S \dots\dots\dots(L3)$$

$$G_n^{\min} = (\bar{x} - x_n^{\min})/S \dots\dots\dots(L4)$$

L 1.4 按表 L1,查出对应于 n, α 的临界值 $G_{1-\alpha(n)}$, 将 $G_n > G_{1-\alpha(n)}$ 的 x_n 剔除。

表 L1. 格拉布斯表

$G_{1-\alpha(n)}$ α n	$G_{1-\alpha(n)}$		$G_{1-\alpha(n)}$ α n	$G_{1-\alpha(n)}$	
	0.05	0.01		0.05	0.01
3	1.15	1.15	16	2.44	2.75
4	1.46	1.49	17	2.47	2.79
5	1.67	1.75	18	2.50	2.82
6	1.82	1.94	19	2.53	2.85
7	1.94	2.10	20	2.56	2.88
8	2.03	2.22	21	2.58	2.91
9	2.11	2.32	22	2.60	2.94
10	2.18	2.41	23	2.62	2.96
11	2.23	2.48	24	2.64	2.99
12	2.29	2.55	25	2.66	3.01
13	2.33	2.61	30	2.75	3.10
14	2.37	2.66	40	2.87	3.24
15	2.41	2.71	50	2.96	3.34

L 1.5 将应剔除数据去掉后,再按 L1.1 条重新进行,直至所有统计量 G_n 都小于表 L1 之临界值 $G_{1-\alpha(n)}$ 为止。

L 2 剔除疏失误差的另一种方法

L 2.1 列出各测值,并求出算术平均值 \bar{x} 、标准差 S 和或然误差 $\gamma^{1)}$ 。

注:1)当计算或然误差时用。

L 2.2 算术平均值、标准差和或然误差之关系见表 L2:

表 L2

误 差	S	γ	\bar{x}
S	1.000	1.4826	1.2533
γ	0.6745	1.0000	0.8454
\bar{x}	0.7989	1.1829	1.0000

L 2.3 算出可疑值 x_i 与算术平均值 \bar{x} 之差 v_i 与标准差 S 或或然误差 γ 之比 v_i/S 或 v_i/γ 。

L 2.4 由观测次数 n 按表 L3 将凡大于表中 $[v_i/S]$ 或 $[v_i/\gamma]$ 值的观察值剔除。

表 L3

n	$[v_i/S]$	$[v_i/\gamma]$	n	$[v_i/S]$	$[v_i/\gamma]$
5	1.69	2.5	20	2.23	3.3
10	1.96	2.9	50	2.56	3.8
15	2.16	3.2	100	2.83	4.2

附录 M
误差计算实例
(参考件)

列出以下实例以供参考。实例中许多选取的极限误差数值(经验数值)并不具有适用性,不作为任何其他试验时直接采用。

M 1 燃料弹筒热值的测量误差

仪器型号:JR-7A 型绝热式量热仪

鉴定方法:使用标准苯甲酸(其低位热值 Q_{Gr} 为 $26.47 \times 10^3 \text{ J/g}$) 确定该仪器精确度。

M 1.1 试验数据见表 M1:

表 M1

	J/g					
试验序号	1	2	3	4	5	6
测定值 $x_i \times 10^{-3}$	26.46	26.49	26.45	26.44	26.45	26.46

M 1.2 计算见表 M2:

表 M2

序号	名称	符号	公式和计算	数值	单位
1	测量值算术平均值	\bar{x}	$\frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$	26.46×10^3	J/g
2	标准差	S	$\left[\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1} \right]^{\frac{1}{2}}$	20.09	J/g
3	系统误差	σ_{SD}	$\bar{x} - Q_{\text{Gr}}$	10	J/g
4	置信水平	$1-\alpha$	取 定	0.95	—
5	置信系数	t	查 表 27	2	—
6	单次测量的极限误差	R	$t \times S = 2 \times 20.09$	40.18	J/g
7	仪器的综合测量极限误差	σ_R	$\sqrt{\sigma_{\text{SD}}^2 + R^2}$	42.55	J/g

注:表 M1 中数据已经格拉布斯方法检验无疏失误差。

M 2 用国家标准中煤的工业分析及元素分析同一试样平行测定的最大允差来计算煤的应用基低位发热量误差。

化验数据: $Q_{\text{Gr}} = 25.67 \times 10^3 \text{ kJ/kg}$; $Q_{\text{Gr}} = 23.72 \times 10^3 \text{ kJ/kg}$;

$W^y = 7.16\%$; $W^t = 3.0\%$; $H^t = 3.11\%$

M 2.1 计算见表 M3:

表 M3

序号	名称	符号	公式和计算	数值	单位
1	低位热值计算公式	Q_{6w}	$Q_{6w} \left(\frac{100 - W^r}{100 - W^r} \right) - 54H^r - 6W^r$	—	kJ/kg
2	计算误差公式	σ	$\left\{ \left[\left(\frac{100 - W^r}{100 - W^r} \right) \sigma_Q \right]^2 + \left[\left(\frac{Q_{6w}}{100 - W^r} + 6 \right) \sigma_{w^r} \right]^2 + \left[\frac{Q_{6w}(100 - W^r)}{(100 - W^r)^2} \sigma_{w^r} \right]^2 + [54 \sigma_{H^r}]^2 \right\}^{0.5}$	—	kJ/kg
3	氧弹分析允差	σ_Q	取国家标准不同实验室允差的一半(GB 213)	104.7	kJ/kg
4	应用基水分允差 %	σ_{w^r}	取同一试验室允差的一半(GB 211)	0.2	
5	分析基水分允差 %	σ_w	取同一试验室允差的一半(GB 212)	0.1	
6	应用基氢允差 %	σ_{H^r}	取同一试验室 σ_{H^r} 的一半(GB 212)	0.08	
7	低位热值计算误差	σ	$\left\{ \left[\left(\frac{100 - 7.16}{100 - 3} \right) \times 104.7 \right]^2 \left[\left(\frac{25.67 \times 10^3}{100 - 3} + 6 \right) \times 0.2 \right]^2 + \left[\frac{25.67 \times 10^3 (100 - 7.16)}{(100 - 3)^2} \times 0.1 \right]^2 + [54 \times 0.08]^2 \right\}^{0.5}$	116.8	kJ/kg

M 3 用奥氏分析仪分析烟气成分中三原子气体和氧气的误差

M 3.1 分析误差

M 3.1.1 测量记录见表 M4:

表 M4

测量顺序	1	2	3	4	5	6	7	8
RO ₂ %	13.8	13.2	14.4	14.4	14.1	13.7	14.1	14.5
O ₂ %	4.8	4.6	4.7	4.6	3.6	3.6	3.5	3.6

M 3.1.2 计算见表 M5:

表 M5

序号	名称	符号	公式计算	数值	单位
1	随机误差	R_1	取最小读数的一半	0.1	mL
2	计量筒刻度偏差	R_2		0.1	mL
3	操作偏差	R_3	考虑微量水附壁效应	0.05	mL
4	吸收偏差	R_4	吸收不完全引起	RO ₂ , 0.08 O ₂ , 0.1	mL
5	气样温度变化的相对偏差 %	R_{06}	相对偏差	0.1	
6	RO ₂ , O ₂ 计算公式		$RO_2 = \frac{V_0 - V_1}{V_0} \times 100$	—	
7	原始体积	V_0	实测	100	mL
8	吸收 RO ₂ 后剩余体积	V_1	实测	86.2	mL
9	气体温度变化的偏差	R_5	$R_{06} \times \frac{V_0}{100} = 0.1 \times \frac{100}{100}$	0.1	mL
10	吸收 O ₂ 后的剩余体积	V_2	实测	81.4	mL
11	RO ₂ 气体温度变化偏差	$R_{5 \cdot RO_2}$	$R_{06} \times \frac{V_2}{100} = 0.1 \times \frac{86.2}{100}$	0.086	mL
12	O ₂ 气体温度变化偏差	$R_{5 \cdot O_2}$	$0.1 \times \frac{81.4}{100}$	0.081	mL
13	V_0 的极限偏差	R_{V_0}	$\sqrt{R_1^2 + R_2^2 + R_3^2 + R_4^2 + R_5^2}$	0.18	mL
14	V_1 的极限偏差	R_{V_1}	$\sqrt{R_1^2 + R_2^2 + R_3^2 + R_4^2 + R_{5 \cdot RO_2}^2}$	0.19	mL
15	RO ₂ 计算值 %	RO ₂	$RO_2 = \frac{V_0 - V_1}{V_0} \times 100$	13.8	
16	RO ₂ 总误差 %	σ_{RO_2}	$\left[\left(\frac{\partial RO_2}{\partial V_1} \right)^2 R_{V_1}^2 + \left(\frac{\partial RO_2}{\partial V_0} \right)^2 R_{V_0}^2 \right]^{0.5}$ $= \left[\left(-\frac{1}{V_0} \right)^2 \times R_{V_1}^2 + \left(\frac{V_1}{V_0^2} \right)^2 \times R_{V_0}^2 \right]^{0.5}$	0.25	

续表 M5

序号	名称	符号	公式计算	数值	单位
17	RO ₂ 相对总误差 %	$\sigma_{o \cdot RO_2}$	$\frac{\sigma_{RO_2}}{RO_2} \times 100\% = \frac{0.25}{13.8} \times 100$	1.81	
18	O ₂ 计算公式	O ₂	$O_2 = \frac{V_1 - V_2}{V_0} \times 100$	4.8	
19	O ₂ 总误差 %	σ_{O_2}	$\left[\left(\frac{\partial O_2}{\partial V_1} \right)^2 R_{V_1}^2 + \left(\frac{\partial O_2}{\partial V_2} \right)^2 R_{V_2}^2 + \left(\frac{\partial O_2}{\partial V_0} \right)^2 R_{V_0}^2 \right]^{0.5}$ $= \left[\left(\frac{1}{V_0} \right)^2 R_{V_1}^2 + \left(\frac{1}{V_0} \right)^2 R_{V_2}^2 + \left(\frac{V_1 - V_2}{V_0^2} \right)^2 R_{V_0}^2 \right]^{0.5}$	0.28	
20	O ₂ 相对总误差 %	$\sigma_{o \cdot O_2}$	$\frac{\sigma_{O_2}}{O_2} = \frac{0.28}{4.8} \times 100$	5.8	

M 3.2 测试数据波动分析

如果测试数据的变化仅仅是由于分析误差所致,则测量中最大和最小数值的极差应小于二倍总误差,即:

$$RO_2^{\max} - RO_2^{\min} < 2\sigma_{RO_2}$$

$$O_2^{\max} - O_2^{\min} < 2\sigma_{O_2}$$

对本例,均已超出,故分析为工况波动引起的测值变化。

M 3.3 场误差

如果测量中,未预先标定取样点浓度与代表点浓度的比值(当不为同一点时)作为修正系数,则要考虑取样控制点抽取试样代表性不强所产生的误差。

若取该相对误差为 $\sigma_{o \cdot c} = 3\%$,

则本例总相对误差为:

$$\sigma_{o \cdot RO_2} = \sqrt{1.74^2 + 3^2} = 3.47\%$$

$$\sigma_{o \cdot O_2} = \sqrt{5.8^2 + 3^2} = 6.5\%$$

M 3.4 上述计算得出之误差均为相对极限误差。若取置信系数 t 为 2,则相对误差(非极限)为上述 M3.1、M3.3 条数值的一半。

M 4 过热蒸汽流量测量误差

a. 测量参数:

流量 $D = 200t/h$

压力 $p=1.3239\text{MPa}$

温度 $t_{\text{汽}}=550^{\circ}\text{C}$

b. 节流件结构参数:

流量系数 $\alpha=1.0734$

管道内径 $D_n=221\text{mm}$

节流件直径比 $\beta=0.6952$

M 4.1 计算见表 M6:

表 M6

序号	名称	符号	公式与计算	数值	单位
1	流量系数 α 的相对标准差 %	S_{α}		0.7484	
2	置信系数	t	取 定	2	—
3	流量系数的相对极限差 %	R_{α}	$2S_{\alpha}$	1.5	
4	流量膨胀系数的 相对标准差 %	S_{α}		0.007516	
5	膨胀系数相对极差 %	R_{α}	$t \times S_{\alpha}$	0.015	
6	节流孔 d 的相对标准差 %	S_{d_n}		0.05	
7	节流孔相对极差 %	R_{d_n}	$t \times S_{d_n}$	0.1	
8	管道内径 D_n 的相对标准差 %	S_{D_n}		1	
9	管道内径相对极差 %	R_{D_n}	$t \times S_{D_n}$	2	
10	压差测量相对极限误差 %	$R_{\Delta p}$	采用 DBC-310 电动压差变送器	1.56	
11	工质密度 ρ 的相对标准差 %	S_{ρ}		1.5	
12	工质密度相对极差 %	R_{ρ}	$t \times S_{\rho}$	3	
13	流量测量相对 极限误差 %	$R_{\text{总}}$	$\left[R_{\alpha}^2 + R_{\beta}^2 + 4\left(\frac{\beta^4}{\alpha}\right)^2 R_{\beta}^2 \right. \\ \left. + 4\left(1 + \frac{\beta^4}{\alpha}\right)^2 R_{d_n}^2 \right. \\ \left. + \frac{1}{4} R_{\rho}^2 + \frac{1}{4} R_{\Delta p}^2 \right]^{0.5}$	2.43	

M 5 锅炉热效率误差分析实例

本例以超高压再热机组为误差计算对象(该系统中无外来热源和余热利用),其中有些数值取自经验值,不推荐直接采用,但可作为参考。

M 5.1 表 M7 为煤的工业分析及元素分析同一试样平行测定的最大允差。

表 M7

分析项目	条件	同一实验室	不同实验室	数据来源
全水分 W^* %	当 $W^* < 20$ $W^* \geq 20$	0.4 0.5	—	GB 211
分析基水分 W^* %	当 $W^* < 5$ $W^* \geq 5 \sim 10$ $W^* > 10$	0.2 0.3 0.4	—	GB 212
分析基灰分 A^* %	当 $A^* < 15$ $A^* \geq 15 \sim 30$ $A^* > 30$	0.2 0.3 0.5	0.3 0.5 0.7	GB 212
可燃基挥发分 V^* %	当 $V^* < 10$ $V^* \geq 10 \sim 45$ $V^* > 45$	0.3 0.5 1.0	0.5 1.0 1.5	
分析基氧弹筒发热量 Q_{br} kJ/kg	当 $A^* < 30$ $A^* \geq 30$	83.74 125.60	209.94 251.21	GB 213
分析基全硫 S_b %	当 $S_b < 1$ $S_b \geq 1 \sim 4$ $S_b > 4$	0.05 0.1 0.2	0.1 0.2 0.3	GB 214
分析基硫化铁硫 S_f %	当 $S_f < 1$ $S_f \geq 1 \sim 4$ $S_f > 4$	0.05 0.1 0.2	0.1 0.2 0.3	GB 215
分析基硫酸盐硫 S_s %	—	0.05	0.1	—
分析基有机硫 S_o %	按 $\Delta S_o = \Delta S_o + \Delta S_o + \Delta S_o$	—	—	—
分析基碳 C^* %	—	0.5	—	GB 212
分析基氢 H^* %	—	0.15	—	
分析基氮 N^* %	—	0.1	0.15	
分析基碳酸盐灰分的 CO_2 含量 A_{CO_2} %	—	0.1	0.15	GB 218
分析基氧 O^* %	按 $\Delta O^* = \Delta H^* + \Delta A^* + \Delta S_b + \Delta C^* + \Delta H^* + \Delta N^* + \Delta A_{CO_2}$			
灰渣可燃物 C^* %	—	0.2	—	—

M 5.2 计算见表 M8;

表 M8

序号	名称	符号	公式与计算	数值	单位
一、给定条件					
1	锅炉燃料耗量	B		53.61	kg/h
2	主蒸汽流量	D_{m1}		400	t/h
3	再热蒸汽流量	D_{m2}		330	t/h
4	再热器减温喷水流量	D_{s1}		0	kg/h
5	主蒸汽焓增	Δh_{m1}	$h_{m1} - h_{m0}$	2442.7	kJ/kg
6	再热蒸汽焓增	Δh_{m2}	$h_{m2} - h_{m1}$	480.44	kJ/kg
7	再热器减温喷水焓增	Δh_{s1}	$h_{s1} - h_{s0}$	2878.9	kJ/kg
8	燃料高位分析基热值	Q_{bw}		25673.5	kJ/kg
9	燃料低位应用基热值	Q_{bw}		23718.2	kJ/kg
10	燃料应用基水分, %	W^r		7.16	
11	燃料分析基水分, %	W^f		3.0	
12	燃料分析基灰分, %	A^f		23.12	
13	燃料分析基碳, %	C^f		64.53	
14	燃料分析基氢, %	H^f		3.11	
15	燃料分析基氧, %	O^f		4.36	
16	燃料分析基氮, %	N^f		1.39	
17	燃料分析基硫, %	S^f		0.49	
18	燃料飞灰比率, %	a_m		90	
19	燃料炉渣比率, %	a_b		10	
20	飞灰含碳量, %	C_f		10	
21	炉渣含碳量, %	C_z		5	
22	排烟中 RO_2 含量, %	RO_2		12.56	
23	排烟中 O_2 含量, %	O_2		8.0	
24	排烟温度	θ_w		139	℃
25	锅炉进风温度	t_x		20	℃
26	过热蒸汽出口温度	t_{m1}		540	℃
27	再热蒸汽出口温度	t_{m2}		540	℃
28	过热蒸汽出口压力	p_{m1}		13.83	MPa
29	再热蒸汽出口压力	p_{m2}		2.45	MPa
二、输入—输出法热效率误差计算					
1	锅炉热效率计算公式		$\frac{100[D_{m1}\Delta h_{m1} + D_{m2}\Delta h_{m2} + D_{s1}\Delta h_{s1}]}{B(Q_{bw} + Q_m + Q_{w1} + Q_{w2})}$	—	

续表 M8

序号	名称	符号	公式与计算	数值	单位
2	热效率相对误差计算公式 (设 Q_{rs} 忽略不计, 且 D_{s1} 为零)	σ_{η}	$\left\{ \sigma_{\dot{b}_{rs}}^2 + \sigma_{\dot{b}_{rs}'}^2 + (\sigma_{\dot{b}_{rs}}^2 + \sigma_{\dot{b}_{rs}'}^2) \right.$ $\times \left(1 - \frac{100D_{s1}\Delta h_{rs} + 100D_{s2}\Delta h_{s2}}{\eta BQ_{bw}} \right)^2$ $+ (\sigma_{\dot{b}_{rs}}^2 + \sigma_{\dot{b}_{rs}'}^2)$ $\times \left(1 - \frac{100D_{rs}\Delta h_{rs} + 100D_{s2}\Delta h_{s2}}{\eta BQ_{bw}} \right)^2$ $+ (\sigma_{\dot{b}_{rs}}^2 + \sigma_{\dot{b}_{rs}'}^2)$ $\left. \times \left(1 - \frac{100D_{rs}\Delta h_{rs} + 100D_{s2}\Delta h_{s2}}{\eta BQ_{bw}} \right)^2 \right\}^{0.5}$		
3	锅炉热效率, %	η	$\frac{100}{BQ_{bw}} (D_{rs}\Delta h_{rs} + D_{s2}\Delta h_{s2}) = \frac{100}{53.61 \times 23718.2}$ $\times (400 \times 2422.7 + 330 \times 480.44)$	88.68	
4	燃料测量误差, %	σ_{wb1}	标准表 28	0.25	
5	制粉系统波动及存粉误差, %	σ_{wb2}	经验值	0.1	
6	燃料测量总相对误差, %	σ_{wb}	$[\sigma_{wb1}^2 + \sigma_{wb2}^2]^{0.5}$	0.27	
7	应用基低位热值分析误差计算公式	$\sigma_{Q_{bw}'}^2$	$\left\{ \left[\left(\frac{100 - W'}{100 - W'} \right) \sigma_{Q_{bw}'} \right]^2 + \left[\left(\frac{Q_{bw}'}{100 - W'} + 6 \right) \sigma_{w'} \right]^2 \right.$ $\left. + \left[\frac{Q_{bw}'(100 - W')}{(100 - W')^2} \sigma_{\dot{b}} \right]^2 + [226.09 \sigma_{H'}]^2 \right\}^{0.5}$	—	kJ/kg
8	燃料高位热值分析误差	$\sigma_{Q_{bw}'}^2$	取 $\approx \sigma_{Q_{tr}'}^2$, 查表 M7	209.34	kJ/kg
9	应用基水分分析误差, %	$\sigma_{w'}$	查表 M7	0.4	
10	分析基水分分析误差, %	$\sigma_{w''}$	查表 M7	0.2	
11	应用基氢分析误差, %	$\sigma_{H'}$	$\approx \sigma_{H''}$, 查表 M7	0.15	
12	应用基低位热值分析误差	$\sigma_{Q_{bw}'}^2$	$\left[\left(\frac{100 - 7.16}{100 - 3} \right) \times 209.34 \right]^2$ $+ \left[\left(\frac{25673.5}{100 - 3} + 6 \right) \times 0.4 \right]^2$ $+ \left[\frac{25673.5(100 - 7.16)}{(100 - 3.0)^2} \times 0.2 \right]^2$ $+ [226.09 \times 0.15]^2$	235.76	kJ/kg
13	应用基低位热值相对分析误差, %	$\sigma_{Q_{bw}'}^2$	$\frac{100 \times \sigma_{Q_{bw}'}^2}{Q_{bw}'} = \frac{235.76}{23718.2} \times 100$	1.0	

续表 M8

序号	名称	符号	公式与计算	数值	单位
14	采样及制样热值相对误差, %	$\sigma_{\text{QD}_{\text{DW}.2}}$	经验值	0.50	
15	应用基低位热值总相对分析误差, %	$\sigma_{\text{QD}_{\text{DW}}}$	$(\sigma_{\text{QD}_{\text{DW}.1}} + \sigma_{\text{QD}_{\text{DW}.2}})^{0.5}$	1.12	
16	主蒸汽流量测量相对误差, %	$\sigma_{\text{QD}_{\text{M}}}$	表 28	1.25	
17	再热蒸汽流量测量相对误差, %	$\sigma_{\text{QD}_{\text{RH}}}$	经验值	1.6	
18	主蒸汽焓增极限相对误差, %	$R_{\text{Dab}_{\text{M}}}$	按汽、水温度测量极限误差±1%	1.1	
19	主蒸汽焓增误差, %	$\sigma_{\text{Dab}_{\text{M}}}$	取置信系数 $t=3, \frac{1.1}{3}$	0.36	
20	再热蒸汽焓增相对极限误差, %	$R_{\text{Dab}_{\text{RH}}}$		4.7	
21	再热蒸汽焓增相对误差, %	$\sigma_{\text{Dab}_{\text{RH}}}$	$\frac{\sigma_{\text{Dab}_{\text{RH}}}}{t} = \frac{4.7}{3}$	1.6	
22	热效率计算相对误差, %	σ_{η}	$\left\{ (0.27^2 + 1.12^2 + (1.25^2 + 0.36^2) \times (1 - \frac{100 \times 330 \times 480.44}{88.68 \times 53.61 \times 23718.2})^2 + (1.6^2 + 1.6^2) \times (1 - \frac{100 \times 400 \times 2422.7}{88.68 \times 53.61 \times 23718.2})^2 \right\}^{0.5}$	1.67	
23	热效率测量误差, %	σ_{η}	$\frac{1}{100} \eta \times \sigma_{\eta} = \frac{88.68}{100} \times 1.67$	1.48	
			三、热量损失法、热效率误差计算		
1	锅炉效率计算公式	η	$100 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6)$	—	
2	固体未完全燃烧热损失, %	q_4	$q_4^{\text{R}} + q_4^{\text{I}} = 3.147 + 0.166$	3.31	
		q_4^{R}	$\frac{337.27A'}{Q_{\text{DW}}} \times a_{\text{R}} \times \frac{C_{\text{R}}}{100 - C_{\text{R}}}$ $= \frac{337.27 \times 22.13}{23718.2} \times 90 \times \frac{10}{100 - 10}$	3.147	
		q_4^{I}	$\frac{337.27 \times 22.13}{23718.2} \times 10 \times \frac{5}{100 - 5}$	0.166	
3	固体未完全燃烧热损失误差计算公式	σ_{q_4}	$\frac{1}{100} \left\{ q_4^{\text{I}} (\sigma_{a_{\text{R}}} + \sigma_{\text{QD}_{\text{DW}}})^2 + \left[q_4^{\text{R}} - \left(\frac{a_{\text{R}}}{100 - a_{\text{R}}} \right) q_4^{\text{I}} \right]^2 \sigma_{a_{\text{R}}}^2 + \left[q_4^{\text{R}} \left(\frac{100}{100 - C_{\text{R}}} \right) \sigma_{\text{OC}_{\text{R}}} \right]^2 + \left[q_4^{\text{R}} \times \left(\frac{100}{100 - C_{\text{R}}} \right) \sigma_{\text{OC}_{\text{L}}} \right]^2 \right\}^{0.5}$	—	

续表 M8

序号	名称	符号	公式与计算	数值	单位
4	应用基灰分误差, %	σ_{0A}	$\approx \sigma_{0A}$, 查表 M7	1.36	
5	燃料飞灰比率误差, %	σ_{0a_n}	经验值	5.5	
6	飞灰含碳分析误差, %	$\sigma_{bc_n,1}$	查表 M7	2	
7	飞灰含碳取样误差, %	$\sigma_{bc_n,2}$	经验值	5	
8	飞灰含碳量分析总误差, %	σ_{bc_n}	$(\sigma_{bc_n,1}^2 + \sigma_{bc_n,2}^2)^{0.5}$	5.4	
9	炉渣含碳分析误差, %	$\sigma_{bc_L,1}$		4.0	
10	炉渣含碳取样误差, %	$\sigma_{bc_L,2}$	经验值	10	
11	炉渣含碳量总相对分析误差, %	σ_{bc_L}	$(\sigma_{bc_L,1}^2 + \sigma_{bc_L,2}^2)^{0.5}$	10.8	
12	固体未完全燃烧热损失误差, %	σ_{q_4}	$\frac{1}{100} \{ 3.31^2 \times (1.36^2 + 1.12^2) + [3.147 - (\frac{90}{100-90}) \times 0.166]^2 \times 5.5^2 + [3.147 \times (\frac{100}{100-10}) \times 5.4]^2 + [0.166 \times (\frac{100}{100-5}) \times 10.8]^2 \}^{0.5}$	0.22	
13	锅炉排烟热损失计算公式	q_2	$\frac{(QY + Q_{H_2O}^{H_2O})}{Q_r} \times 100$	—	
14	干烟气带走的热量	QY	$V_{sv} C_{p,sv} (\theta_{sv} - t_0)$	—	kJ/kg
15	烟气含水蒸汽显热	$Q_{H_2O}^{H_2O}$	$V_{H_2O} C_{p,H_2O} (\theta_{sv} - t_0)$	—	kJ/kg
16	送风机出口风温	t_0	取与进口风温 t_0 同	20	°C
17	排烟温度	θ_{sv}		139	°C
18	干烟气平均比热计算公式	$C_{p,sv}$	$C_{p,CO_2} \frac{RO_2}{100} + C_{p,N_2} \frac{100 - RO_2}{100}$	—	kJ/(m ³ ·K)
19	CO ₂ 的平均定压比热	C_{p,CO_2}	查附录 C	1.7342	kJ/(m ³ ·K)
20	N ₂ 的平均定压比热	C_{p,N_2}	查附录 C	1.2973	kJ/(m ³ ·K)
21	RO ₂ 份额%	RO ₂		12.56	
22	干烟气平均定压比热	$C_{p,sv}$	$1.7342 \times \frac{12.56}{100} + 1.2973 \times \frac{100 - 12.56}{100}$	1.3522	kJ/(m ³ ·K)
23	每千克燃料干烟气体积	V_{sv}	$(V_{sv}^0)^2 + (\sigma_{sv}^0 - 1)(V_{sv}^0)^2 = 6.024 + (1.612 - 1) \times 6.027$	9.7938	m ³ /kg

续表 M8

序号	名称	符号	公式与计算	数值	单位
24	理论干烟气量	$(V_{\text{干}})^{\circ}$	$1.866 - \frac{C^{\circ} + 0.375S^{\circ}}{100} + 0.79(V_{\text{干}})^{\circ} + 0.8 \times \frac{N^{\circ}}{100}$ $= 1.866 - \frac{60.311 + 0.375 \times 0.469}{100} + 0.79$ $\times 6.027 + 0.8 \times \frac{1.330}{100}$	6.024	m ³ /kg
25	理论干空气量	$(V_{\text{干}})^{\circ}$	$0.0889(C^{\circ} + 0.375S^{\circ}) + 0.265H^{\circ} - 0.0333O^{\circ}$ $= 0.0889 \times (60.311 + 0.375 \times 0.469) + 0.265$ $\times 2.977 - 0.0333 \times 4.173$	6.027	m ³ /kg
26	燃料应用基灰分, %	A ^o		22.128	
27	燃料应用基碳, %	C ^o		61.762	
28	燃料应用基氢, %	H ^o		2.977	
29	燃料应用基氧, %	O ^o		4.173	
30	燃料应用基氮, %	N ^o		1.330	
31	燃料应用基硫, %	S ^o		0.469	
32	排烟过量空气系数 (实测)	α_p	$\frac{21}{21 - (O_2 - 0.5CO - 0.5H_2 - 2CH_4)}$ $= \frac{21}{21 - (8 - 0.5 \times 0.056)}$	1.612	—
33	排烟处烟气含氧量, %	O ₂		8.0	
34	排烟处烟气中 CO 含量, %	CO		0.056	
35	燃料应用基实际烧掉的碳, %	C ^o	$C^{\circ} - \frac{A^{\circ} \bar{C}}{100} = 61.762 - \frac{22.128 \times 10.53}{100}$	59.4	
36	灰渣中平均总碳量与燃煤总灰渣之比率, %	\bar{C}	$\frac{a_u C_{\text{L}}}{100 - C_{\text{L}}} + \frac{a_m C_{\text{H}}}{100 - C_{\text{H}}}$ $= \frac{10 \times 5}{100 - 5} + \frac{90 \times 10}{100 - 10}$	10.53	
37	灰渣平均含碳量误差, %	σ_c	$\left\{ \left(\frac{C_{\text{L}}}{100 - C_{\text{L}}} \right)^2 \sigma_{a_u}^2 + \left[\frac{100 a_u}{(100 - C_{\text{L}})^2} \right]^2 \sigma_{C_{\text{L}}}^2 \right.$ $\left. + \left(\frac{C_{\text{H}}}{100 - C_{\text{H}}} \right)^2 \sigma_{a_m}^2 + \left[\frac{100 a_m}{(100 - C_{\text{H}})^2} \right]^2 \sigma_{C_{\text{H}}}^2 \right\}^{0.5}$ $= \left\{ \left(\frac{5}{100 - 5} \right)^2 \times 5.5^2 + \left[\frac{100 \times 10}{(100 - 5)^2} \right]^2 \times 10.8^2 \right.$ $\left. + \left(\frac{10}{100 - 10} \right)^2 \times 5.5^2 + \left[\frac{100 \times 90}{(100 - 10)^2} \right]^2 \times 5.4^2 \right\}^{0.5}$	6.155	

续表 M8

序号	名称	符号	公式与计算	数值	单位
38	燃料应用基实际烧掉的碳误差, %	σ_{C_f}	$\left\{ \sigma_{C_f}^2 + \left(\frac{\bar{C}}{100}\right)^2 \sigma_{A_f}^2 + \left[\frac{A_f}{100}\right]^2 \sigma_{C_f}^2 \right\}^{0.5}$ $= \left\{ 0.5^2 + \left(\frac{10.53}{100}\right)^2 \times 1.36^2 + \left[\frac{22.128}{100}\right]^2 \times 6.155^2 \right\}^{0.5}$	1.46	
39	干烟气带走的热量	$Q_{干}$	$9.7938 \times 1.3522 \times (139 - 20)$	1575.94	kJ/kg
40	水蒸气平均定压比热	C_{p, H_2O}		1.5119	kJ/(m ³ ·K)
41	烟气中水蒸汽容积	V_{H_2O}	$1.24 \times \left[\frac{9H^2 + W^2}{100} + 0.0129 a_{H_2O} (V_{H_2O}^c)^2 \right]$ $= 1.24 \times \left[\frac{9 \times 2.98 + 7.16}{100} + 0.0129 \times 1.612 \times 6.027 \right]$	0.577	m ³ /kg
42	烟气中的水蒸气显热	$Q_{H_2O}^0$	$0.577 \times 1.5119 \times (139 - 20)$	106.9	kJ/kg
43	锅炉排烟热损失, %	q_2	$[(1575.9 + 106.9) / 23718.2] \times 100$	7.005	
44	排烟热损失误差计算公式	σ_{q_2}	$\left\{ \left(\frac{100}{Q_r}\right)^2 (\sigma_{Q_{干}}^2 + \sigma_{Q_{H_2O}^0}^2) + \left[\frac{100 \times (Q_{干} + Q_{H_2O}^0)}{Q_r^2} \right]^2 \sigma_{q_2}^2 \right\}^{0.5}$	—	
45	干烟气带走热量误差计算公式	$\sigma_{Q_{干}}^2$	$\left[(C_{p, H_2O} \cdot \Delta\theta)^2 \sigma_{V_{H_2O}}^2 + (V_{H_2O} \Delta\theta)^2 \times \sigma_{C_{p, H_2O}}^2 + (V_{H_2O} C_{p, H_2O})^2 \sigma_{\Delta\theta}^2 \right]^{0.5}$	—	kJ/kg
46	干烟气体积误差计算公式	$\sigma_{V_{干}}^c$	$\left[\sigma_{V_{干}^c}^2 + (V_{干}^c)^2 \times \sigma_{V_{干}^c}^2 + (\sigma_{V_{干}^c} - 1)^2 \sigma_{V_{干}^c}^2 \right]^{0.5}$	—	m ³ /kg
47	理论干烟气体积误差计算公式	$\sigma_{(V_{干}^c)^t}$	$\left[\left(\frac{-1}{100}\right)^2 \sigma_{C_f}^2 + \left(\frac{0.375}{100}\right)^2 \times \sigma_{A_f}^2 + (0.79)^2 \sigma_{(V_{干}^c)^t}^2 + \left(\frac{0.8}{100}\right)^2 \sigma_{W}^2 \right]^{0.5}$	—	m ³ /kg
48	理论干空气体积误差计算公式	$\sigma_{(V_{干}^c)^t}$	$\left[(0.0889 \sigma_{C_f})^2 + (0.265 \sigma_{H_2})^2 + (0.0333 \sigma_{O_2})^2 + (0.0333 \sigma_{N_2})^2 \right]^{0.5}$	—	
49	应用基氮分析误差, %	σ_{N^y}	$\approx \sigma_{N^t}$, 查表 M7	0.1	
50	应用基碳分析误差, % (实际烧掉的)	σ_{C_f}	$\approx \sigma_{C_f}$, 查表 M7	1.78	
51	应用基氧分析误差, %	σ_{O^y}	$(0.2 + 0.3 + 0.10 + 0.5 + 0.15 + 0.1 + 0.1)$	1.45	
52	应用基硫分析误差, %	σ_{S^y}	$\approx \sigma_{S^t}$, 查表 M7	0.1	
53	理论干空气体积误差	$\sigma_{(V_{干}^c)^t}$	$\left[(0.0889 \times 1.46)^2 + (0.265 \times 0.15)^2 + (0.0333 \times 1.45)^2 + (0.0333 \times 0.1)^2 \right]^{0.5}$	0.144	m ³ /kg

续表 M8

序号	名称	符号	公式与计算	数值	单位
54	理论干烟气体积误差	$\sigma_{(V_{dV})^c}$	$\left[\left(\frac{-1}{100} \right)^2 \times 1.46^2 + \left(\frac{0.375}{100} \right)^2 \times 0.1^2 + 0.79^2 \right. \\ \left. \times 0.1702^2 + \left(\frac{0.8^2}{100} \times 0.1^2 \right)^{0.5} \right]$	0.115	m ³ /kg
55	过量空气系数误差, %	σ_{α}^2	$\sqrt{\left\{ \frac{21}{[21 - (O_2 - 0.5CO)]^2} \right\}^2 (\sigma_{O_2}^2 + \sigma_{CO}^2)}$ $= \sqrt{\left\{ \frac{21}{[21 - (8 - 0.5 \times 0.056)]^2} \right\}^2 \times (0.3^2 + 0.02^2)}$	0.03712	
56	烟气中氧量误差, %	σ_{O_2}	经验值	0.3	
57	烟气中 CO 误差, %	σ_{CO}	经验值	0.02	
58	干烟气体积误差, %	$\sigma_{V_{dV}}$	$\left\{ \sigma_{(V_{dV})^c}^2 + [(V_{dV}^c) \sigma_{\alpha}^2]^2 + (\alpha_{\alpha}^2 - 1)^2 \sigma_{(V_{dV})^c}^2 \right\}^{0.5}$ $= \{ 0.115^2 + [6.027 \times 0.03712]^2 \\ + (1.612 - 1)^2 \times 0.144^2 \}^{0.5}$	0.267	
59	干烟气平均定压比热误差计算公式	$\sigma_{C_{p, dV}}$	$\left[\left(\frac{RO_2}{100} \right)^2 \sigma_{C_{p, CO_2}}^2 + \left(\frac{C_{p, CO_2} - C_{p, N_2}}{100} \right)^2 \right. \\ \left. \times \sigma_{RO_2}^2 + 1^2 \times \sigma_{C_{p, N_2}}^2 \right]^{0.5}$	—	kJ/(m ³ ·K)
60	排烟温度相对误差, %	$\sigma_{W_{py}}$	计入场误差	3.0	
61	排烟温度误差	$\sigma_{t_{py}}$		4.2	℃
62	二氧化碳平均定压比热误差	$\sigma_{C_{p, CO_2}}$	按相对误差 3% 计算	0.052	kJ/(m ³ ·K)
63	氮平均定压比热误差	$\sigma_{C_{p, N_2}}$	按相对误差 3% 计算	0.039	kJ/(m ³ ·K)
64	排烟中 CO ₂ 误差, %	σ_{RO_2}	经验值	0.3	
65	干烟气平均定压比热误差计算	$\sigma_{C_{p, dV}}$	$\left[\left(\frac{12.56}{100} \right)^2 \times 0.052^2 + \left(\frac{1.7342 - 1.2973}{100} \right)^2 \right. \\ \left. \times 0.3^2 + 0.039^2 \right]^{0.5}$	0.04	kJ/(m ³ ·K)
66	排烟温度与冷风温度之差的误差	$\sigma_{\Delta t}$	$(\sigma_{t_{py}}^2 + \sigma_{t_0}^2)^{0.5} = (4.2^2 + 0.8^2)^{0.5}$	4.3	℃
67	冷风温度相对误差, %	σ_{W_0}	计入场误差(经验值)	4.0	
68	冷风温度误差	σ_{t_0}	经验值	0.8	℃

续表 M8

序号	名称	符号	公式与计算	数值	单位
69	干烟气带走热量 误差计算	σ_{Q_F}	$\{ [1.3522 \times (139 - 20)]^2 \times 0.267^2 + [9.7938 \times (139 - 20)]^2 \times 0.040^2 + (9.7938 \times 1.3522)^2 \times 4.3^2 \}^{0.5}$	82.2	kJ/kg
70	烟气中水蒸气显 热误差计算公式	$\sigma_{Q_{H_2O}^0}$	$\{ [C_{p,H_2O}(\Delta\theta)]^2 \sigma_{H_2O}^2 + [V_{H_2O}(\Delta\theta)]^2 \times \sigma_{V,H_2O}^2 + (V_{H_2O} C_{p,H_2O})^2 \sigma_{M^2} \}^{0.5}$	—	kJ/kg
71	水蒸气平均定压 比热相对误差,%	σ_{C_p,H_2O}	经验值	3.0	
72	水蒸气平均定压 比热误差,%	σ_{C_p,H_2O}		0.045	kJ/(m ³ ·K)
73	水蒸气体积误差 计算公式	$\sigma_{V_{H_2O}}$	$\left\{ \left(\frac{9 \times 1.24}{100} \right)^2 \sigma_{H_2}^2 + \left(\frac{1.24}{100} \right)^2 \sigma_{O_2}^2 + (1.24 \times 0.0129 \times \alpha_{H_2O})^2 \sigma_{V_{H_2O}}^2 + [1.24 \times 0.0129 \times (V_{H_2O}^0)^2] \sigma_{M^2}^2 \right\}^{0.5}$	—	m ³ /kg
74	应用基氢分析误 差,%	σ_{H^*}	表 M7	0.15	
75	应用基水分析误 差,%	σ_{W^*}	表 M7	0.4	
76	水蒸气体积误差	$\sigma_{V_{H_2O}}$	$\left[\left(\frac{9 \times 1.24}{100} \right)^2 \times 0.15^2 + \left(\frac{1.24}{100} \right)^2 \times 0.4^2 + (1.24 \times 0.0129 \times 1.612)^2 \times 0.144^2 + (1.24 \times 0.0129 \times 6.027)^2 \times 0.037^2 \right]^{0.5}$	0.0184	m ³ /kg
77	烟气中水蒸气显 热误差计算	$\sigma_{Q_{H_2O}^0}$	$[(1.5119 \times 119)^2 \times 0.018^2 + (0.5679 \times 119)^2 \times 0.045^2 + (0.5679 \times 1.5119)^2 \times 4.3^2]^{0.5}$	5.72	kJ/kg
78	应用基低位热值 相对误差,%	$\sigma_{Q_{DW}^0}$	输入—输出法误差计算	1.12	
79	应用基低位热值 误差	$\sigma_{Q_{DW}^0}$	$\sigma_{Q_{DW}^0} \times Q_{DW} = \frac{1.12}{100} \times 23718.2$	265.6	kJ/kg
80	排烟热损失误差,%	σ_{q_2}	$\left\{ \left(\frac{100}{23718.2} \right)^2 \times (82.2^2 + 5.72^2) + \left[\frac{100 \times (1575.9 + 106.9)}{23718.2} \right]^2 \times 265.6^2 \right\}^{0.5}$	0.37	
81	可燃气体未燃尽热 损失计算公式	q_3	$\frac{1}{Q_r} V_{H_2} (126.36CO + 358.18CH_4 + 107.98H_2 + 590.79C_2H_6) \times 100$	—	

续表 M8

序号	名称	符号	公式与计算	数值	单位
82	可燃气体未完全燃烧热损失误差计算公式	σ_{q_3}	$\left[\left(\frac{q_3}{Q_r} \right)^2 \sigma_{q_3}^2 + \left(\frac{q_3}{V_{gr}} \right)^2 \sigma_{V_{gr}}^2 + \left(\frac{100 \times 126.36 V_{gr}}{Q_r} \right)^2 \sigma_{CO}^2 \right. \\ \left. + \left(\frac{100 \times 358.18 V_{gr}}{Q_r} \right)^2 \sigma_{CH_4}^2 + \left(\frac{100 \times 107.98 V_{gr}}{Q_r} \right)^2 \sigma_{H_2}^2 \right. \\ \left. + \left(\frac{100 \times 590.79 \times V_{gr}}{Q_r} \right)^2 \sigma_{C_m H_n}^2 \right]^{0.5}$	—	
83	可燃气体未完全燃烧损失, %	q_3	$\frac{1}{Q_r} V_{gr} \times 126.36 CO \times 100$ $= \frac{1}{23718.2} \times 9.321 \times 126.36 \times 0.056 \times 100$	0.28	
84	可燃气体未完全燃烧损失误差(忽略CH ₄ 、H ₂ 、C _m H _n), %	σ_{q_3}	$\left[\left(\frac{0.28}{23718.2} \right)^2 \times 265.6^2 + \left(\frac{0.28}{9.321} \right)^2 \times 0.23^2 \right. \\ \left. + \left(\frac{0.28}{0.056} \right)^2 \times 0.02^2 \right]^{0.5}$	0.1	
85	锅炉散热损失, %	q_5	查附录 F	0.461	
86	q_5 的相对误差, %	σ_{q_5}	经验值	33	
87	散热损失误差, %	σ_{q_5}	$q_5 \times \sigma_{q_5} = 0.461 \times 0.33$	0.15	
88	灰渣物理热损失, %	q_6		0.3	
89	q_6 的相对误差, %	σ_{q_6}	经验值	15	
90	灰渣物理热损失误差, %	σ_{q_6}	$q_6 \times \sigma_{q_6} = 0.3 \times 0.15$	0.05	
91	总热损失, %	$\sum_{i=2}^6 q_i$	$q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6$ $= 7.095 + 0.28 + 3.31 + 0.461 + 0.3$	11.45	
92	锅炉热效率, %	η	$100 - \sum_{i=2}^6 q_i$	88.55	
93	总热损失误差, %	$\sigma_{\Sigma q}$	$\left[\sigma_{q_2}^2 + \sigma_{q_3}^2 + \sigma_{q_4}^2 + \sigma_{q_5}^2 + \sigma_{q_6}^2 \right]^{0.5}$ $= \sqrt{0.37^2 + 0.10^2 + 0.22^2 + 0.15^2 + 0.05^2}$	0.47	
94	热效率 η 的误差, %	σ_{η}	$= \sigma_{\Sigma q}$	0.47	
95	效率的相对误差, %	σ_{η}	$\frac{\sigma_{\eta}}{\eta} \times 100 = \frac{0.47}{88.55} \times 100$	0.53	

附录 N
温度测量装置
(补充件)

N 1 玻璃水银温度计

N 1.1 温度计基本技术参数见表 N1。

表 N1 实验室玻璃水银温度计的基本技术参数

序号	测量范围 ℃	分度值 ℃	最大全长 mm	标尺最小 长度 mm	贮液球底至标尺起点 最小长度 mm	直 径 mm	浸没长度 mm	示值允许 误 差 ℃	
H	0~50	0.5	250	100	70	6~7.5	局浸 70	±0.5	
	0~100								
	100~200								
	200~300								
I	0~50	1	250	100	70	6~7.5		±1.0	
	0~100								
	0~150		300	140				6~8	±1.5
	0~200								
	0~300		420	250		局浸 100	±2.0		
	0~350								
J	0~300	2	300	140	70	6~7.5	±3.0		
	0~400		350						
	0~500		380	175			100	6~8	±4.0
	0~600		420						210

N 1.2 水银温度计的安装及使用

N 1.2.1 除试验前应进行校验外,试验后还应做零位校验,尤其在冷热交替变化下使用后,应重新标定。

N 1.2.2 内标式玻璃水银温度计使用前均应检查其刻度板与外套的相对位置是否正确。

N 1.2.3 当测量水或蒸汽温度时,温度计插入被测介质的深度应不小于管径的 1/3,并尽可能插至管道中心。

N 1.2.4 应将温度计装于气流充分扰动的区段中,并迎着或垂直于气流流向。

N 1.2.5 不得把玻璃水银温度计用在温度有可能超过最大刻度的地方,使用时也不能将此温度计迅速插入高温或迅速从高温中抽出。

N 2 热电偶温度计

N 2.1 热电偶基本技术参数见表 N2。

表 N2

热电偶名称	分度号	使用温度℃		允 差		偶 丝 直 径 mm	
		长期	短期	等级	使用温度 ℃		允 差 ℃
铂铑 ₁₀ -铂	S	1300	1600	I	0~1100	±1	0.5- $\bar{1}.02$
					1100~1600	$\pm[1+(t-1100)\times 0.003]$	
铂铑 ₁₃ -铂	FDB-2	1300	1600	I	0~600	±1.5	0.5- $\bar{1}.02$
					600~1600	$\pm 0.25\%t$	
铂铑 ₃₀ -铂铑 ₆	B	1600	1800	II	600~1700	±1.8	0.5- $\bar{1}.02$
					600~800	$\pm 0.3\%t$	
				III	800~1700	±0.25% t	0.5- $\bar{1}.015$
					800~1700	± 4	
镍铬-镍硅 (镍铝)	K	700	800	I	0~400 >400~1300	±1.6 $\pm 0.4\%t$	0.3- $\bar{1}.04$
		800	900				0.5- $\bar{1}.05$
		900	1000				0.8- $\bar{1}.06$ 1.0- $\bar{1}.06$
		1000	1100				1.2- $\bar{1}.06$ 1.5- $\bar{1}.06$
		1100	1200				2.0- $\bar{1}.06$ 2.5- $\bar{1}.10$
		1200	1300				3.2- $\bar{1}.10$
铜-康铜	T	150	200	I	-40~+350	$(\pm 0.5\% \text{ 或 } \pm 0.4\%)t$	0.2- $\bar{1}.04$
		200	250				0.3- $\bar{1}.04$
		200	250				0.5- $\bar{1}.06$
		250	300				1.0- $\bar{1}.06$
		350	400				1.6- $\bar{1}.06$
镍铬-考铜	EA-2	600	800		≤400	±4	
					>400	$\pm 1.0\%t$	

注: t 为所测温度。

续表 N2

热电偶称名	电极识别			电极化学成分	20℃时电阻值 Ω/m 或 (电阻率 $\Omega \cdot cm$)	100℃时电势 mV	技术标准
	极性	代号	认别				
铂铑 ₁₀ —铂铑	正 负	SP SN	较硬 柔软	Pt 90%、Rh 10% Pt 100%	1 0.5	0.645	GB 3772
铂铑 ₁₃ —铂铑	正 负		硬态 柔软	Pt 87%、Rh 13% Pt 100%	0.5	0.647	GB 1598
铂铑 ₃₀ —铂铑	正 负	BP BN	较硬 稍软	Pt 70%、Rh 30% Pt 94%、Rh 6%	1 0.9	0.033	GB 2902
镍铬—镍硅 (镍铝)	正	KP	不亲磁	Cr 9%~10%、Si<0.6% Co<1.2%、Mn<0.2% Ni 余量	(0.7±0.05)	4.095	GB 2614
	负	KN	稍亲磁	Si 2%~30%、Co<0.6% Mn<0.1%、Ni 余量	(0.23±0.05)		
铜—康铜	正 负	TP TN	红 色 银白色	Cu 100% Cu 55%、Ni 45%	[0.017] [0.49±0.01]	4.277	GB 2903
镍铬—考铜	正		色较暗	Cr 9%~10%、Si 0.4% Ni 90%	(0.68)	6.95	JB 913
	负		银白色	Cu 56%~57% Cu 43%~44%	(0.47)		

N 2.2 使用注意事项

N 2.2.1 焊接

a. 热电偶热端(测量端)用气焊、点焊或对焊焊接,焊点直径应不超过两倍热电极直径。铂铑型热电偶不可用焊剂进行焊接,采用焊接应最大限度地抑制氧化作用。

b. 用于存在温度梯度条件下的热电偶热端焊接,不能采用两极相互绞接几圈再焊的方式。

N 2.2.2 绝缘

除热端两根热电极外,其余各点均应相互绝缘,视测温范围可采用:陶瓷、氧化铝、石英和玻璃纤维、聚四氟乙烯、聚乙烯、天然橡胶等材料。

N 2.2.3 保护套管

使用中的热电偶材料可装于带接线盒的气密保护套管内。保护套管材料应为碳钢、不锈钢或铬铁合金等,并能承受温度剧变、耐腐蚀,有良好气密性及足够的机械强度和较高的导热率,在高温下不会与绝缘材料及热电极起作用的材料。

N 2.2.4 补偿导线

a. 常用补偿导线见表 N3;

b. 连接补偿导线时,应使两根补偿导线与热电偶的连接点处于同一温度。

表 N3

热电偶 名称	补偿导线				工作端为 100℃、 冷端为 0℃的 标准热电势 mV	截面为 1.5mm ² 导线每米长 电阻值 Ω
	正 极		负 极			
	材 料	线芯绝缘层颜色	材 料	线芯绝缘层颜色		
铂铑—铂	铜	红	镍铜	白	0.64±0.03	0.03
镍铬—镍硅镍铝	铜	红	康铜	白	4.1±0.15	0.35
镍铬—考铜	镍铬	褐绿	考铜	白	6.90±0.3	0.77
铜—康铜	铜	红	康铜	白	4.10±0.15	0.35

N 2.2.5 冷端补偿

常用冷端补偿法为：绝热法、恒温法、冰点槽法、补偿电桥法等，以恒温法与补偿电桥法为多。

a. 恒温法：将热电偶（或补偿导线）的冷端置于电加热的恒温器内，使用温度控制器将温度控制在 $50 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 。

b. 补偿电桥法：利用不平衡电桥产生的电压，补偿热电偶冷端温度变化引起的热电势变化。国内生产的冷端补偿器（电桥）的性能见表 N4。

表 N4

型 号	配用热电偶	电桥平衡 时温度 ℃	补偿范围 ℃	电 源 V	内 阻 Ω	消 耗 W	补 偿 误 差 mV
WBC-01	铂铑 ₁₀ —铂	20	0~50	0~220	1	8	±0.045
WBC-02	镍铬—镍硅						±0.16
	镍铬—镍铝						±0.18
WBC-03	镍铬—考铜						
WBC-57-LB	铂铑 ₁₀ —铂	—	—	—	—	—	±(0.015+0.0015t)
WBC-57-EV	镍铬—镍硅						±(0.04+0.004t)
	镍铬—镍铝						±(0.065+0.0065t)
WBC-57-EA	镍铬—考铜						

注：① 表中 t 为偏离 20℃ 的温度绝对值；

② WBC-0.1, 0.2, 0.3 型带有使交流 220V 变为直流 4V 的直流稳压装置。

c. 选用热电偶时，还应注意一些与热电偶配接的温度变送器及电子自动电位差计本身已带有补偿线路。能将冷端温度补偿至 0℃ 时，则不必再考虑进行冷端补偿。

N 2.2.6 多点转换开关与接线盒

a. 热电偶多点切换开关应选用双极式，使切换热电偶时，不用的热电偶与测量仪器完全断开。

b. 转换开关与接线盒应置于不受有空气流动或热源辐射影响处。

c. 当同时使用多只热电偶且测点较集中时，推荐采用下列两种补偿导线法以节省补偿导线：

将各热电偶冷端用较短的补偿导线集中到一个接线盒，从那里用铜线引至转换开关。另用一补偿热电偶（可利用补偿导线改制）测取接线盒的温度，直接接入测量线路；将其所产生的热电势加到主热电偶的电势上（见图 N1）；该补偿导线的冷端即为热电偶的冷端，共同冷端接线方法与热电偶共同进行冷端补偿（见图 N2）。

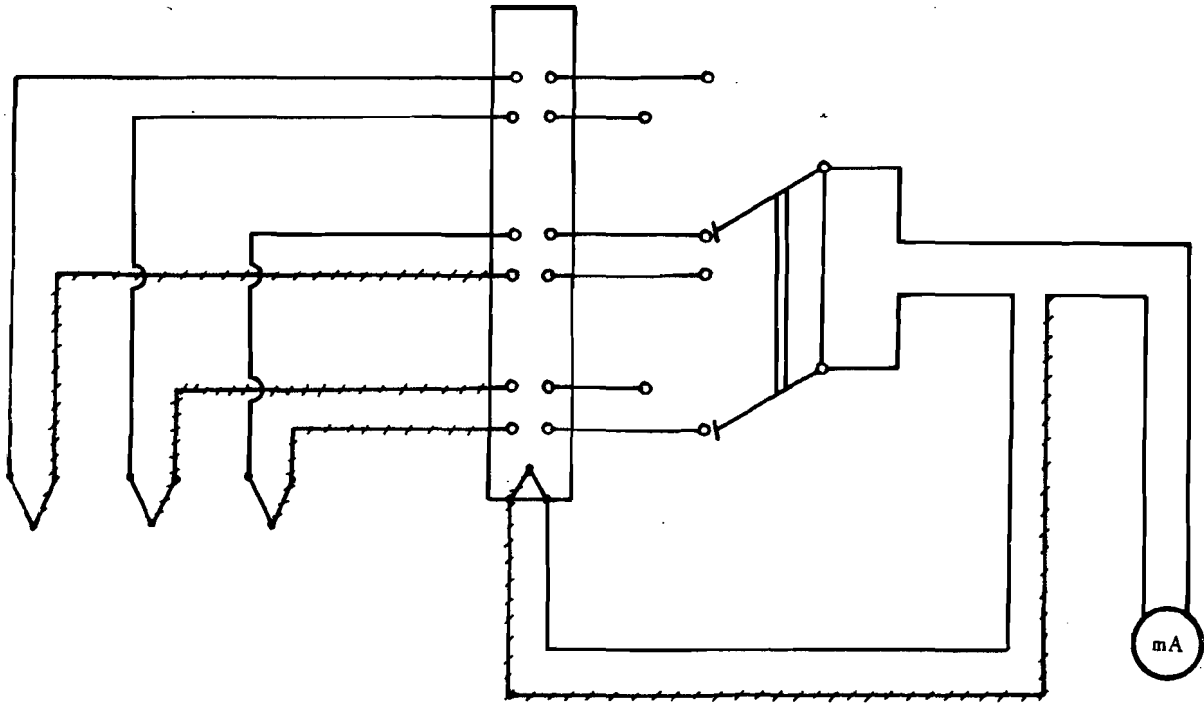


图 N1

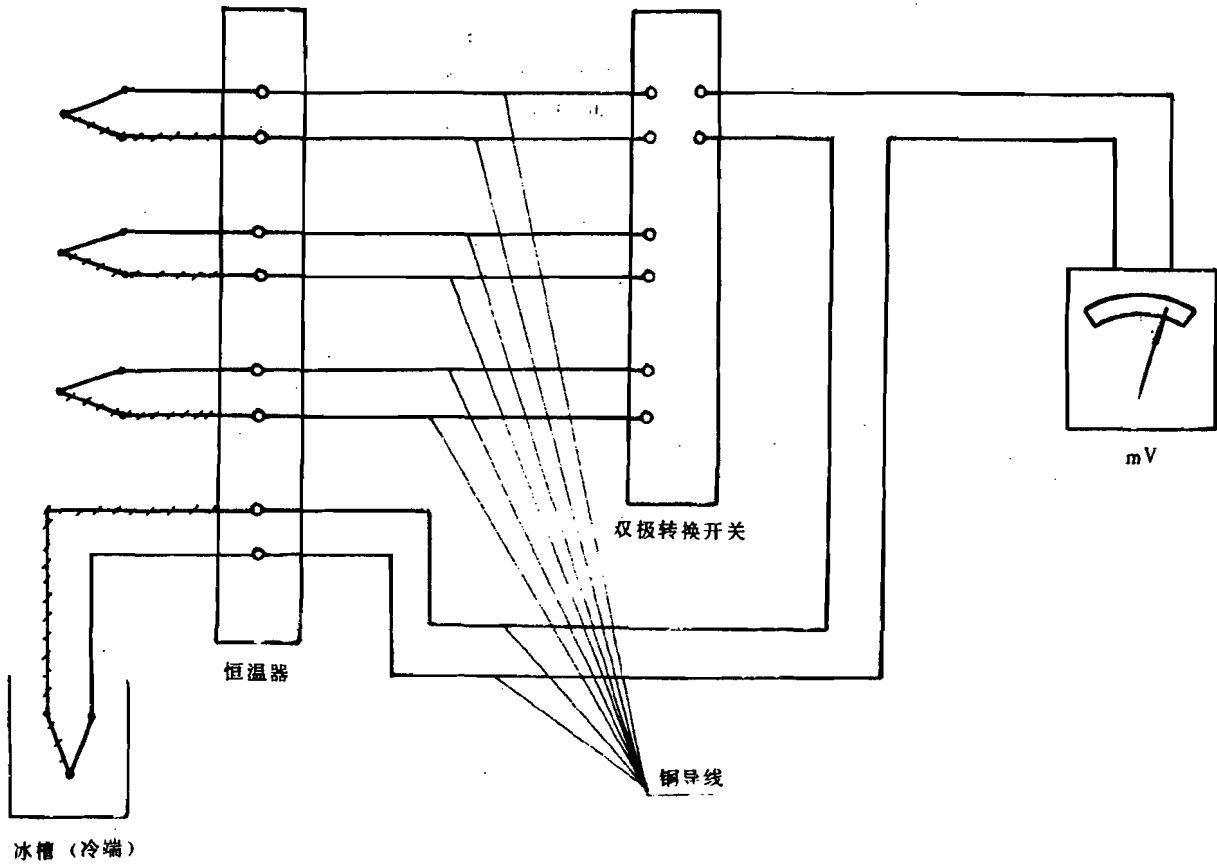


图 N2

N 3 热电偶温度计

N 3.1 热电阻温度计由带套管的热电阻、显示仪表和连接导线组成。锅炉试验常用铂、铜电阻计的材

料、特性以及技术参数见表 N5。

表 N5

热电阻种类	精度等级	分度号	0℃时电阻值及其允差 Ω	100℃时电阻值和 0℃时 电阻值之比及其允差	长期使用温度 ℃
铂热电阻	I	BA1	46±0.046	1.391±0.001	-200~550
		BA2	100±0.010		
铜热电阻	II	G	50±0.050 100±0.100	1.428±0.002	-50~150

续表 N5

热电阻种类	对标准分度表的允差 ℃		电阻材料在 0~100℃的平均 温度系数 α_{100}^0 1/℃
	-200~0	0~650	
铂热电阻	$\pm(0.3 + 6 \times 10^{-3} t)$	$\pm(0.3 + 4.5 \times 10^{-3} t)$	$(3.8 \sim 3.9) \times 10^{-3}$
铜热电阻	$\pm(0.3 \pm 6 \times 10^{-3} t)$		$(4.3 \sim 4.4) \times 10^{-3}$

续表 N5

热电阻种类	材料电阻率 ρ Ω·cm	电阻制成或电阻丝直径	特 性
铂热电阻	0.0981	用 0.05~0.07mm 细铂丝绕在云母 石英或陶瓷支架上	准确度高、稳定性好、可靠。还原气体下使 用应加保护套管。温度与电阻近似线性关 系
铜热电阻	0.017	将 0.1mm 铜丝绕在有绝缘层的金属 管上	温度与电阻保持线性关系, 高温下易氧化

注:① t 为被测温度。

② 如用两台铜电阻温度计,并同时用一个补偿器对两台温度计的电阻作用微调时,准确度可达±0.012℃。

N 3.2 实验室常用比率计和平衡电桥测量热电阻电阻值。锅炉试验常用便携式比率计和自动平衡电桥测量其电阻值。

N 3.3 热电阻与桥路连接采用三线制接法。两根线接在热电阻线圈的一端、一根接在另一端以补偿外界环境温度变化(如铜、镍热电阻),三根线的材料、直径和长度都应相同。

N 3.4 热电阻的校验可参照有关资料中的比较法进行。

N 4 温度计套管

N 4.1 在温度表或感温元件不宜直接与被测介质接触的情况下,应采用温度计套管来保护温度表或感温元件,使其免受还原与氧化侵蚀气氛以及受压介质流动等损害。

N 4.2 选择和设计套管结构应有利于被测介质向其传热,且套管不易向周围介质散热。

- a. 对动态测量误差要求不高时,套管应尽可能使用导热性能差的金属(如不锈钢)制造。
- b. 套管壁厚应按受压介质压力选取,见表 N6。
- c. 套管内径与温度计管外径之差不应大于 1~2mm,温度计插入的孔应用专用螺塞严密封紧。
- d. 套管露出在外的部分与温度计管头应保温。

表 N6

被测介质压力 MPa	套管壁厚 mm
>1.5~5.9	≤2~2.5
>5.9~29.0	≤3~3.5

N 4.3 典型套管结构形式见图 N3。

N 4.4 感温元件应与套管保持紧密接触,可采用直接接触(热电偶)、加衬传热性能好的填充物或金属衬套(其他几种温度计)。

N 4.5 安装测温套管时,要使温度计的感温元件(热电偶)尽可能靠近管道中心线,并迎着工质流动方向。对内径<100mm 的管道,套管与管道轴线间夹角可小于 90°,或装在管道弯头处(见图 N4);对内径>300mm 以上的管道,套管的最大伸入长度(L_{max})会受振动与材料许用应力双重因素的限制,而不一定能伸至管道的中心线。

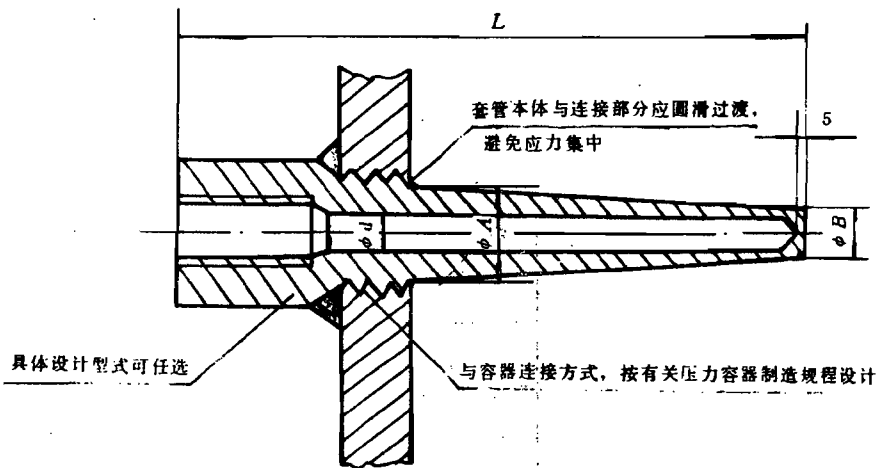


图 N3

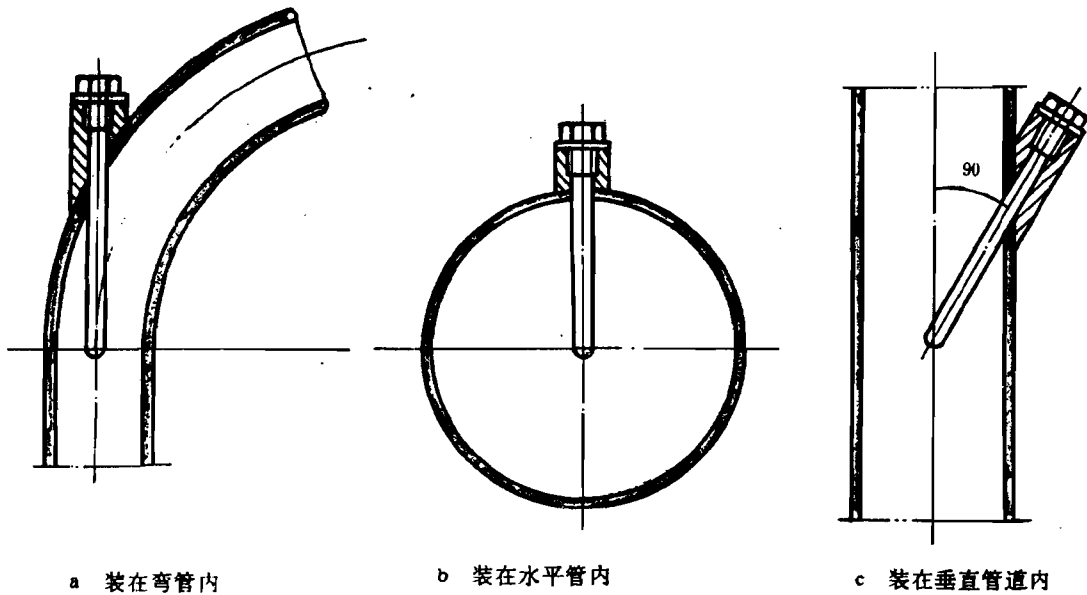


图 N4

附录 O
烟气多点取样混合器
(补充件)

- O 1 烟气多点取样混合器结构见图 O1。
O 2 为便于观察,宜采用有机玻璃制作,且制作完毕须进行密封试验。密封试验的压力不应低于 0.1MPa,或负压不低于 0.01MPa。

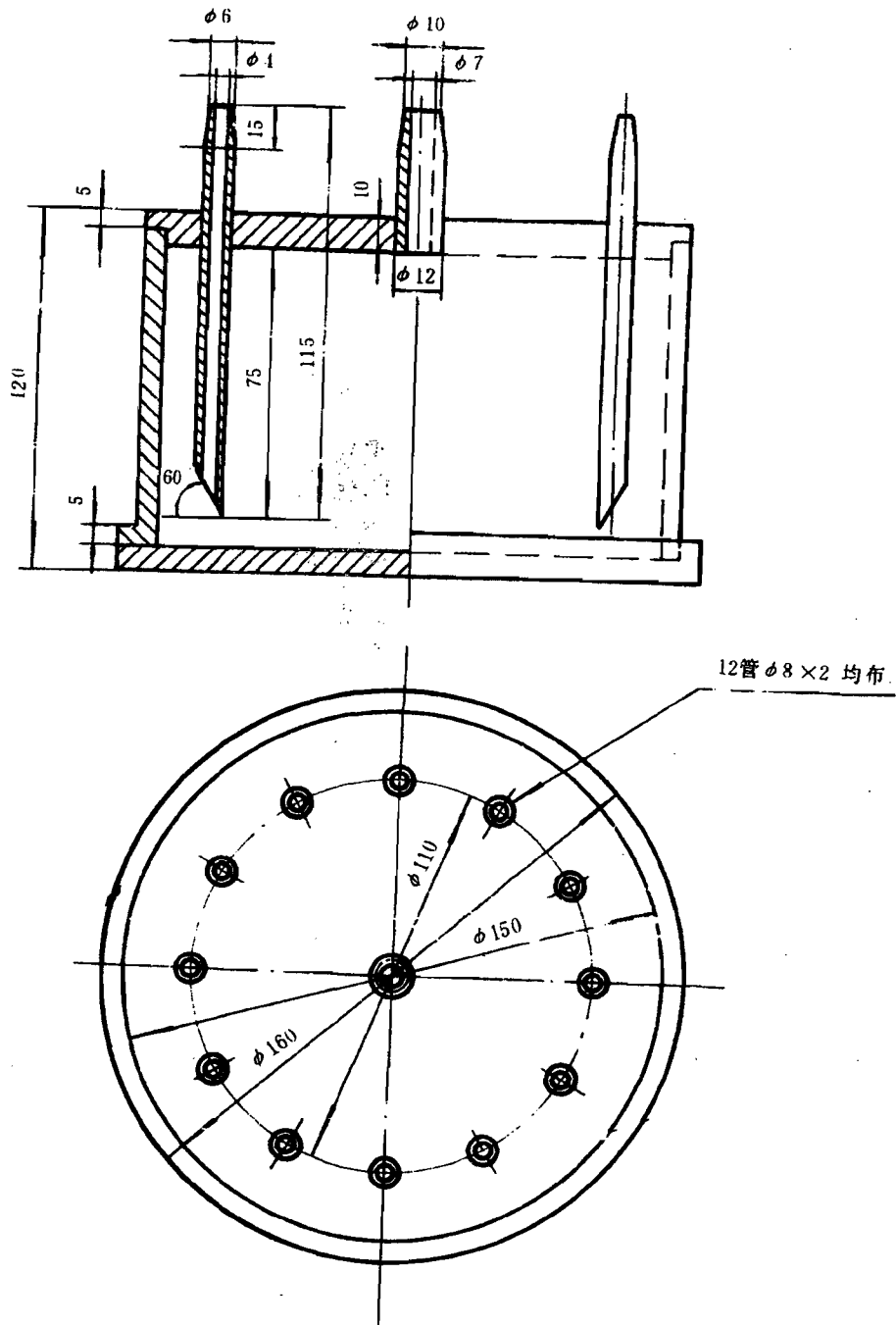


图 O1

附录 P
沉降灰收集器
(补充件)

P 1 沉降灰收集器结构见图 P1。

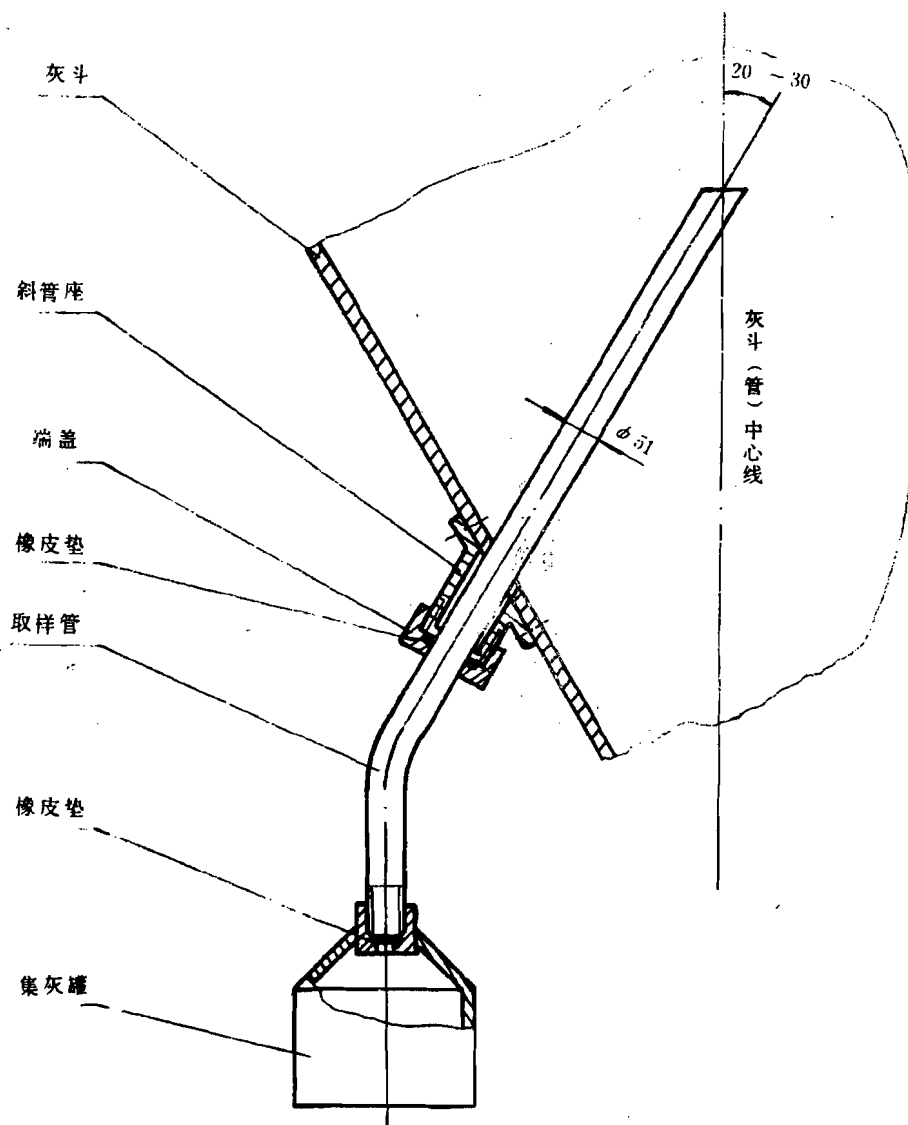


图 P1 沉降灰收集器示意图

附录 Q
水、汽取样装置
(补充件)

Q 1 清洗水取样器

清洗水取样器见图 Q1。

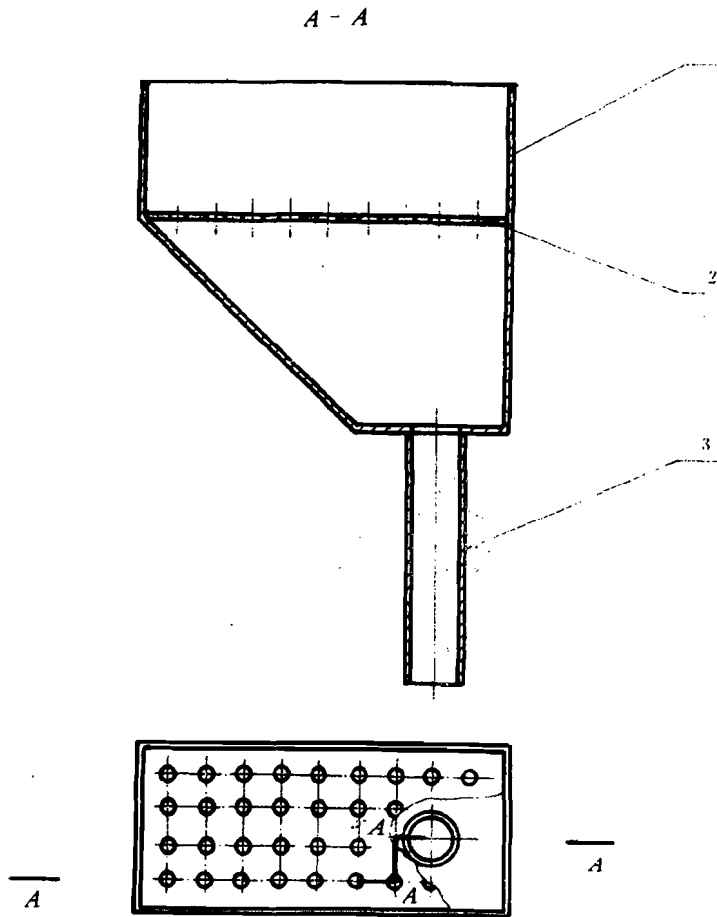


图 Q1 清洗水取样器

1—本体；2—多孔板；3—样品引出管

Q 2 饱和蒸汽取样用探针式取样器

Q 2.1 探针式取样器见图 Q2：

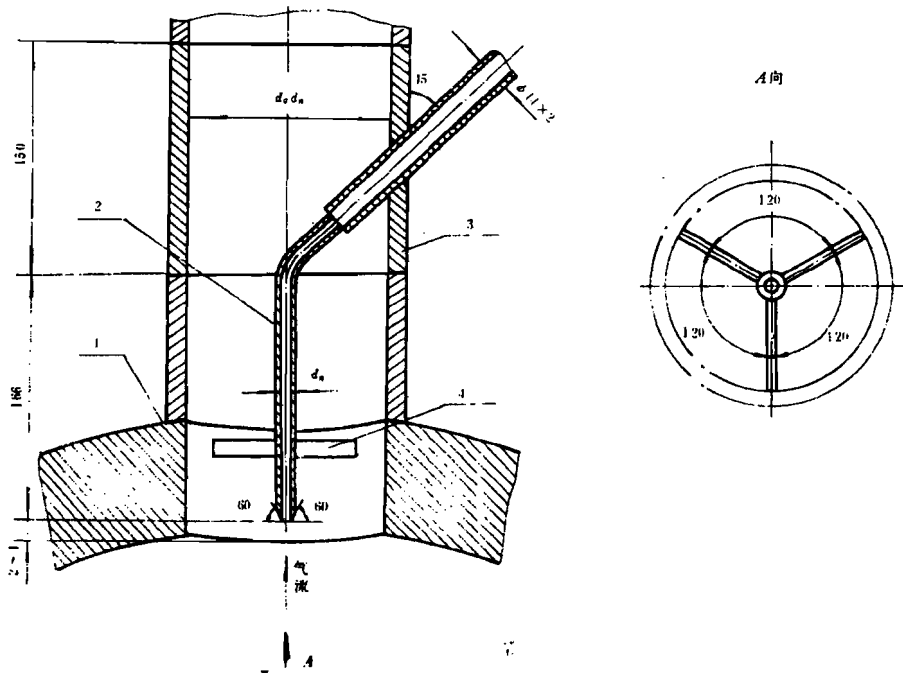


图 Q2 探针式取样器

1—锅筒, 2—取样器, 3—饱和蒸汽引出管, 4—肋板

Q 2.2 取样器入口小管内径计算公式:

$$d_n = d_{bn} \sqrt{\frac{D}{0.9\bar{D}_{bn}}} \dots\dots\dots(Q1)$$

式中: d_n ——取样管内径, mm;

d_{bn} ——饱和蒸汽引出管内径, mm;

D ——设计取样流量, kg/h; 取 $D=30\sim 40$ kg/h;

\bar{D}_{bn} ——在额定蒸发量下每根饱和蒸汽引出管中的平均蒸汽流量, kg/h.

Q 3 饱和蒸汽取样用多孔型取样器

Q 3.1 多孔型取样器结构见图 Q3:

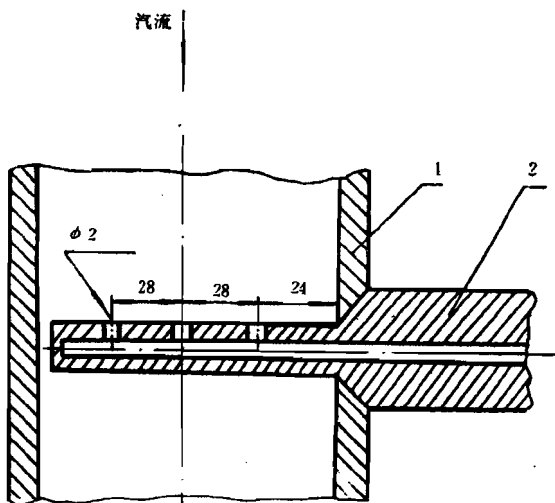


图 Q3 多孔型取样器

1—蒸汽管道, 2—取样管

Q 3.2 取样器开孔数的计算公式:

$$n = \frac{D}{3600 \bar{w}_{\text{bg}} \times 0.785 \times \rho_{\text{bg}} \times d^2} \dots\dots\dots (Q2)$$

式中: n ——开孔数;

d ——取样小孔直径, m;

一般取 $d=0.002\sim 0.003$;

ρ_{bg} ——锅筒压力下的饱和蒸汽密度, kg/m^3 ;

\bar{w}_{bg} ——饱和蒸汽引出管中的平均蒸汽速度, m/s 。

Q 4 过热蒸汽取样用乳头式取样器

Q 4.1 乳头式取样器结构见图 Q4:

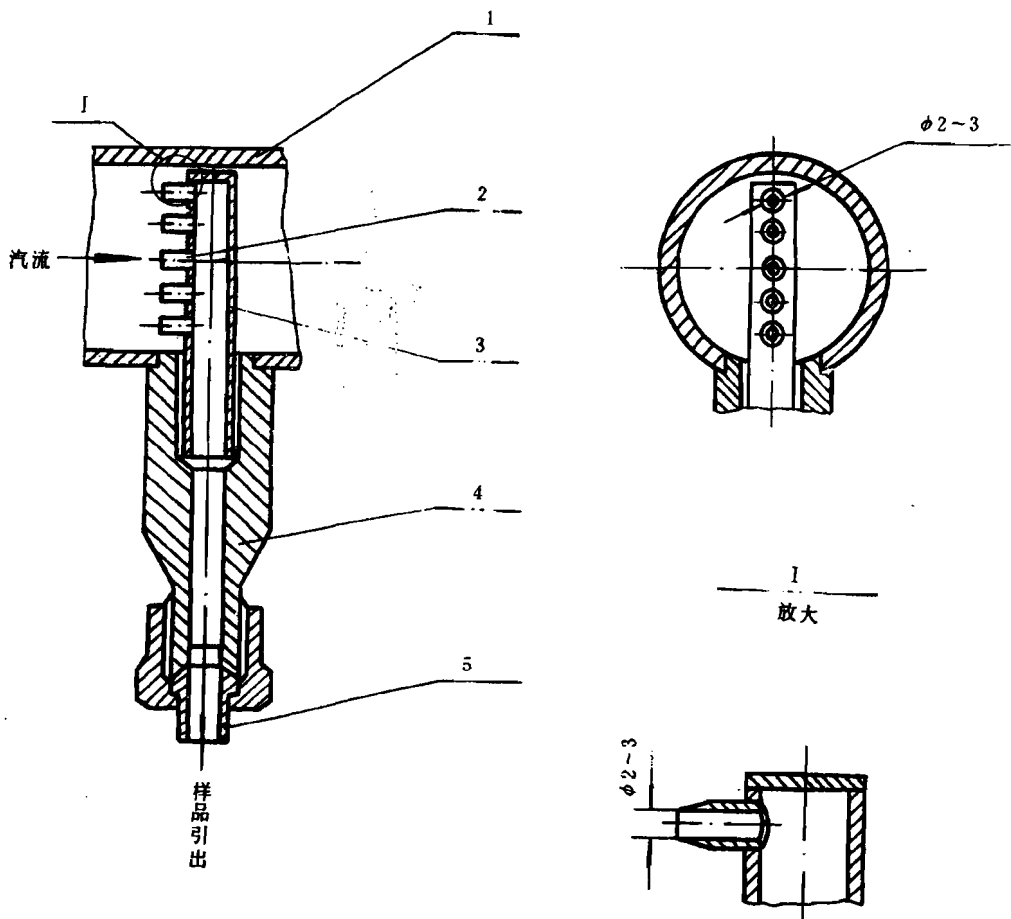


图 Q4 乳头式取样器

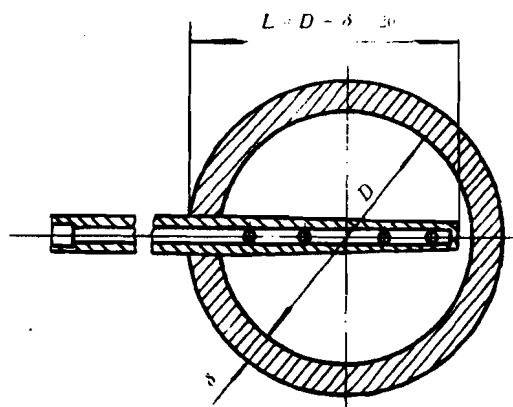
1—蒸汽管道, 2—小管头, 3—取样母管, 4—管接头, 5—样品引出管

Q 4.2 乳头数量计算见式(Q2)。

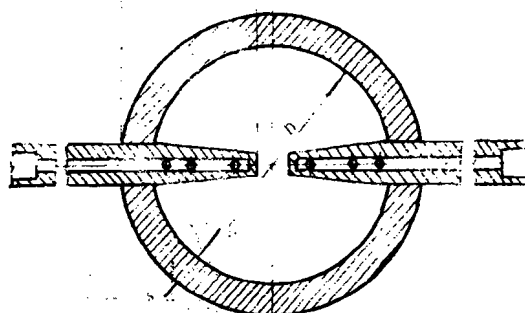
Q 5 过热蒸汽取样用多孔渐缩型取样器

Q 5.1 取样器结构见图 Q5。

Q 5.2 取样器孔数计算见式(Q2)。



a 蒸汽管道内径 $D \leq 150\text{mm}$ 时用单根取样管



b 蒸汽管道内径 $D > 150\text{mm}$ 时用双根取样管

图 Q5 多孔渐缩型取样器

Q 6 锅内蒸汽取样用乳头式取样器

Q 6.1 蒸汽清洗装置前乳头式取样器及安装示意图见图 Q6。

Q 6.2 圆环式乳头取样器及安装示意图见图 Q7。

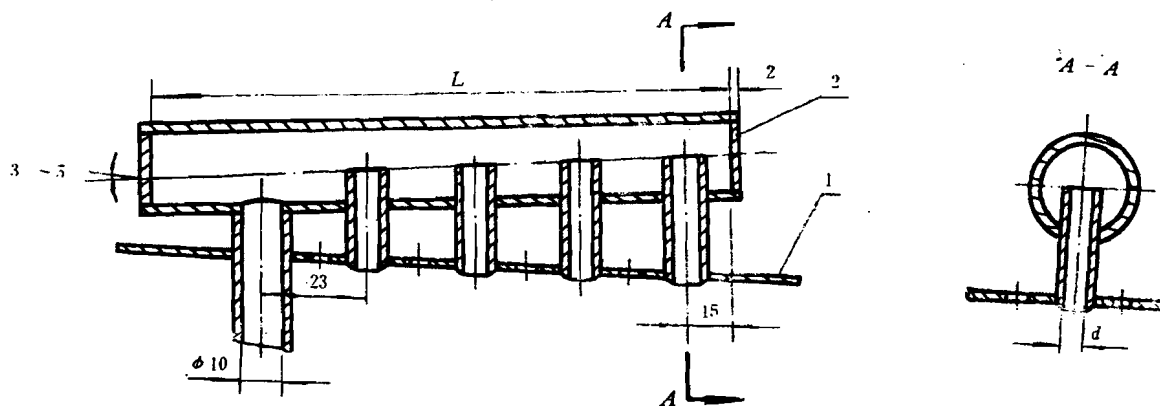


图 Q6 蒸汽清洗装置前, 乳头式取样器及安装示意图

1—清洗孔板; 2—取样器

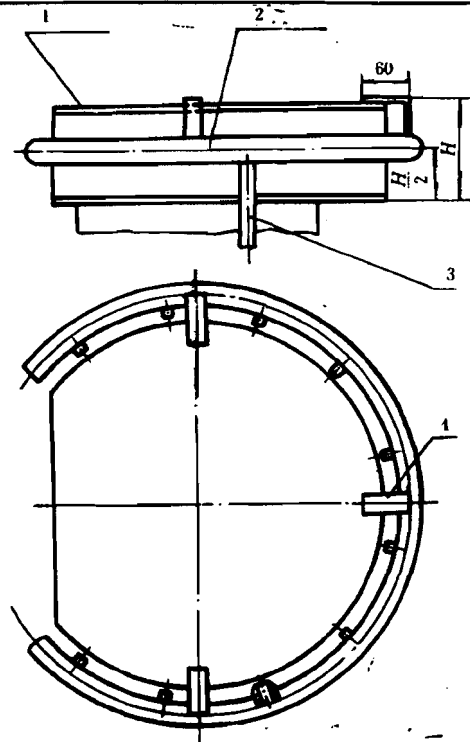


图 Q7 旋风分离器立式圆型顶帽出口的圆环式蒸汽取样器及安装示意图
1—分离器顶帽；2—取样管；3—取样引出管；4—固定角铁

Q 7 锅内蒸汽取样用缝隙式取样器

Q 7.1 缝隙式取样器示意图见图 Q8。

Q 7.2 旋风分离器水平波形板顶帽出口蒸汽取样器及安装示意图见图 Q9。

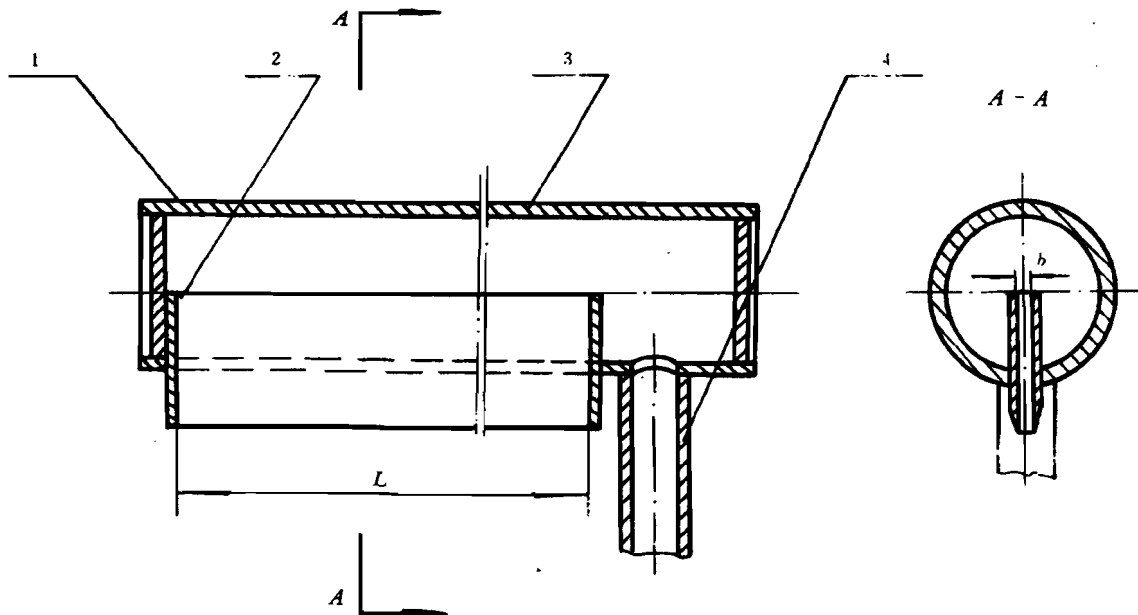


图 Q8 缝隙式取样器

1—蒸汽管道；2—肋板；3—取样母管；4—样品引出管

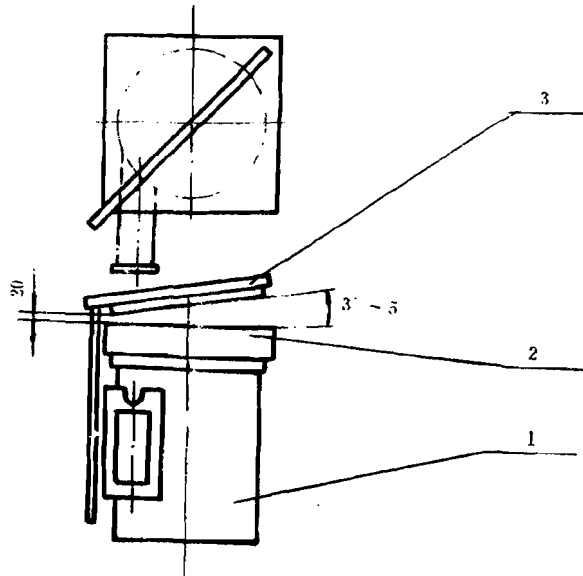


图 Q9 旋风分离器水平波形板顶帽出口蒸汽取样器及安装示意图

1—旋风分离器筒体；2—水平波形板顶帽；3—缝隙式取样器

Q7.3 取样器缝隙长度 L 取定后,其宽度 b 的计算公式如下:

$$b = \frac{D}{3600 \cdot \bar{w}_q \cdot \rho_m \cdot L} \times 1000 \dots\dots\dots(Q3)$$

式中: b ——缝隙宽度,mm;

L ——缝隙长度,m;

\bar{w}_q ——取样器前蒸汽的平均流速,m/s。

附加说明:

本标准由机械电子工业部上海发电设备成套设计研究所归口。

本标准由上海发电设备成套设计研究所、西安热工研究所负责起草。

本标准主要起草人 许传凯、汪友砮、王振文、关必胜、逮思华、楚仲妍、王孟浩、张忠义、徐仁德、李道林、曹汉鼎、陈大空、张敢、朱国桢、葛友康、郝福民、。

中 华 人 民 共 和 国
国 家 标 准
电 站 锅 炉 性 能 试 验 规 程
GB10184—88

*
机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南里一号)
(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

*
版权专用 不得翻印

*
河北省清河县印刷厂 印刷
机械电子工业部机械标准化研究所发行(北京清华东路)

*
开本:880×1230 1/16 印张 $6\frac{3}{4}$ 字数:208 000 千字
1989年12月北京第一版·1989年12月第一次印刷

*
印数:0001—1000

统一书号 111-10655 定价:10.50 元