

ICS 27.060.30

CCS J 98

# 团 体 标 准

T/CIECCPA 063—2025

## 余热锅炉能效环保测试方法

Test method for energy efficiency and environmental protection of waste heat  
boiler

2025 - 01 - 15 发布

2025 - 01 - 24 实施

中国工业节能与清洁生产协会 发布

CFECCPA

## 目 次

前言 .....	III
1 范围 .....	1
2 规范性引用文件 .....	1
3 术语和定义 .....	1
4 符号和单位 .....	1
5 总则 .....	4
6 试验准备 .....	5
7 试验要求 .....	6
8 计算公式 .....	7
9 测量方法和测量装置 .....	13
10 试验报告 .....	23
附录 A (规范性) 余热锅炉炉体散热损失 .....	24
附录 B (资料性) 气体的密度与发热量 .....	25
附录 C (资料性) 常用气体平均定压容积比热 .....	26
附录 D (规范性) 氯离子滴定法化学试剂配制和蒸汽湿度的测定 .....	27
附录 E (资料性) 动压测量管的校准系数测定 .....	28
附录 F (规范性) 烟尘的等速取样方法 .....	30
附录 G (资料性) 设计数据和试验数据综合计算表 .....	33
图 1 余热锅炉能量平衡系统 .....	5
图 2 测量装置 .....	13
图 3 取样器结构 .....	14
图 4 平均温度的测量 .....	15
图 5 圆形截面的管道 .....	16
图 6 矩形截面的管道 .....	17

图 7 标准皮托管 .....	18
图 8 动压测量管 .....	18
图 9 动压测量管 .....	18
图 10 可燃气体的取样系统 .....	19
图 11 冷凝法水分含量测定装置 .....	20
图 12 吸水管 .....	21
图 13 干湿球法水分含量测定装置 .....	22
图 E.1 校准系数 K .....	28
图 E.2 吸气式校准风洞的测量装置 .....	29
图 F.1 等速取样 .....	31
图 F.2 测量装置 .....	31
表 1 符号和单位 .....	2
表 2 过热蒸汽温度的最大允许波动范围 .....	6
表 3 圆形管道等面积环数与布置测点的测量直径数 .....	17
表 4 矩形截面的测点排数 .....	17
表 A.1 蒸汽余热锅炉炉体散热损失 .....	24
表 A.2 热水余热锅炉炉体散热损失 .....	24
表 B.1 气体的密度与发热量 .....	25
表 C.1 常用气体平均定压容积比热 .....	26
表 G.1 余热锅炉设计数据综合表 .....	33
表 G.2 试验数据综合计算表 .....	33

## 前 言

本文件按照 GB/T 1.1-2020 《标准化工作导则 第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国工业节能与清洁生产协会提出并归口管理。

本文件起草单位：吉林省特种设备检验研究院、安康市质量技术检验检测中心、吉林市特种设备检验中心（吉林市特种设备事故调查服务中心）、中国石油天然气股份有限公司兰州化工研究中心、河北省特种设备监督检验研究院保定分院、景德镇市特种设备监督检验中心、绵阳市特种设备监督检验所、内蒙古自治区特种设备检验研究院兴安分院、西安华电清洁能源技术有限公司、本钢板材股份有限公司、吉林省标准研究院、湖州双碳泓能科技有限公司、北京低碳绿标信息技术咨询有限公司。

本文件主要起草人：张铁骥、郑威、孙建军、裴荣国、林红伟、张鹏、蒲欣、金艳霞、朱朝阳、邓向辉、汪树民、徐敏、程林、黄江尚、曾元强、王红梅、张涛、许剑锋、江建忠、张世鑫、曹林涛、姚烨楠、王东明、陈勇生、车帅、高伟、赵东辉、王茹、杜好阳、李尤、唐永贺、刘冠杰、蒋聪、刘月利、朱玲、韩梦珏、沈鑫安、张文婷、梁晓苏、李成功。

CFECCPA

# 余热锅炉能效环保测试方法

## 1 范围

本文件规定了余热锅炉试验方法总则、试验准备、试验要求、计算公式、测量方法和测量装置、试验报告等内容。

本文件适用于以水为工质的烟道式余热锅炉。

## 2 规范性引用文件

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

GB/T 10180 工业锅炉热工性能试验规程

GB/T 10863 烟道式余热锅炉热工试验方法

## 3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

### 3.1

**余热锅炉** waste heat boiler

利用余热介质（各种工业过程中的气体、固体或液体）中含有的显热或（和）可燃物质燃烧后产生的热量（必要时可加补燃料），与烟道中的受热面进行热交换，产生蒸汽或热水的锅炉。

### 3.2

**输入热量** heat input

单位时间内余热介质中含有的显热或（和）可燃物质燃烧后产生的热量的总热量。

### 3.3

**有效输出热量** effective heat output

单位时间内以水为介质在锅炉中所吸收的热量。

### 3.4

**基准温度** reference temperature

为计算锅炉能量平衡中各项输入热量和各项损失热量所确定的起点温度。

### 3.5

**余热利用率** utilization ratio of waste heat

输出热量占输入热量的百分比。

## 4 符号和单位

表 1 中列出的符号和单位适用于本文件。

表 1 符号和单位

序号	符号	名称	单位
1	$B$	单位时间内液体或固体余热资源的质量	kg/h
2	$C_r$	余热资源的比热	$\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{C})$ 或 $\text{kJ}/(\text{m}^3\cdot\text{C})^*$
3	$C_{yc}$	排烟平均定压比热	$\text{kJ}/(\text{m}^3\cdot\text{C})$
4	$C_z$	固体或液体比热	$\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{C})$
5	$D$	过热蒸汽流量, 实测蒸发量	kg/h或t/h
6	$D_G$	蒸汽管道内的蒸汽流量	kg/h
7	$D_{gi}$	过热蒸汽减温水流量	kg/h
8	$d_n$	蒸汽管道的内径	mm
9	$D_x$	修正后的蒸汽质量流量	kg/h
10	$D_s$	仪表指示的蒸汽质量流量	kg/h
11	$D_{zj}$	再热蒸汽减温水流量	kg/h
12	$D'_{zq}$	再热器入口蒸汽流量	kg/h
13	$D_{zs}$	折算蒸发量	t/h
14	$D_{zy}$	自用蒸汽流量	kg/h
15	$G$	热水流量	kg/h
16	$G_{gs}$	给水(质量)流量	kg/h
17	$G_q$	过热蒸汽取样量	kg/h
18	$G_s$	炉水取样量	kg/h
19	$G_w$	冷凝水量或试验中吸水管吸收的水量	g
20	$G_x$	蒸汽取样量	kg/h
21	$h_{bq}$	饱和蒸汽热焓(实测)	kJ/kg
22	$h'_{bq}$	饱和蒸汽设计参数热焓	kJ/kg
23	$h_{cs}$ $h_{cs}$	热水锅炉出水热焓	kJ/kg
24	$h_{gq}$	过热蒸汽热焓(实测)	kJ/kg
25	$h_{gz}$	过热蒸汽设计参数热焓	kJ/kg
26	$h_{gs}$	蒸汽锅炉给水热焓(实测)	kJ/kg
27	$h'_{gs}$	蒸汽锅炉设计参数给水热焓	kJ/kg
28	$h_{gi}$	过热蒸汽减温水热焓	kJ/kg

表 1 符号和单位 (续)

序号	符号	名称	单位
29	$h_{js}$	热水锅炉进水热焓	kJ/kg
30	$h_{zj}$	再热蒸汽减温水热焓	kJ/kg
31	$h'_{zq}$	再热器进口蒸汽的热焓	kJ/kg
32	$h''_{zq}$	再热器出口蒸汽的热焓	kJ/kg
33	$h_{zy}$	自用蒸汽的热焓	kJ/kg
34	$Q_1$	有效输出热量	kJ/h
35	$Q_2$	排烟损失热量	kJ/h
36	$Q_3$	可燃气体不完全燃烧损失热量	kJ/h
37	$Q_4$	可燃固体不完全燃烧损失热量	kJ/h
38	$Q_5$	炉体散热损失热量	kJ/h
39	$Q_6$	其他损失热量,即以固体或液体的显热形式排出余热锅炉的热量	kJ/h
40	$Q_r$	输入热量	kJ/h
41	$Q_m$	输出热水的有效热量	kJ/h
42	$Q_{rw}$	余热资源中所含的可燃物质完全燃烧后放出的热量	kJ/h
43	$Q_{rx}$	余热资源的显热	kJ/h
44	$Q_{zq}$	输出蒸汽的有效热量	kJ/h
45	$Q_{net.ar}$	余热资源中所含的可燃物质的收到基低位发热量	kJ/kg或kJ/m <sup>3</sup>
46	$Q_{rs}$	输出热水的有效热量	kJ/h
47	$q_2$	排烟热损失	%
48	$q_3$	可燃气体不完全燃烧热损失	%
49	$q_4$	可燃固体不完全燃烧热损失	%
50	$q_5$	炉体散热损失	%
51	$q_6$	其他热损失	%
52	$t_b$	炉体平均壁面温度	°C
53	$t_k$	基准温度	°C
54	$t_r$	余热资源的温度	°C
55	$t_y$	烟气温度	°C

表 1 符号和单位（续）

序号	符号	名称	单位
56	$t_{yc}$	余热锅炉出口烟气温度	$^{\circ}\text{C}$
57	$t_z$	固体或液体的温度	$^{\circ}\text{C}$
58	$V$	标准状态下的气体体积流量	$\text{m}^3/\text{h}$
59	$V_{q1}$	余热锅炉区间漏入空气量	$\text{m}^3/\text{h}$
60	$V_y$	烟气体积流量	$\text{m}^3/\text{h}$
61	$V_{yc}$	余热锅炉出口烟气体积流量	$\text{m}^3/\text{h}$
62	$V_{yc}^g$	余热锅炉出口干烟气体积流量	$\text{m}^3/\text{h}$
63	$V_{yj}$	余热锅炉进口烟气体积流量	$\text{m}^3/\text{h}$
64	$w$	烟气流动速度	$\text{m}/\text{s}$
65	$\alpha$	自然对流条件下的炉体放热系数	$\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^{\circ}\text{C})$
66	$\gamma$	炉水的汽化潜热	$\text{kJ}/\text{kg}$
67	$\mu_c$	烟气中含碳量	$\text{mg}/\text{m}^3$
68	$\mu_s$	固体或液体的重量	$\text{kg}/\text{h}$
69	$\varepsilon$	余热利用率	$\%$
70	$\omega$	饱和蒸汽湿度	$\%$
71	$\Sigma Q_i$	各项损失热量之和	$\text{kJ}/\text{h}$

本文件中气体(燃气、烟气、空气)单位符号“ $\text{m}^3$ ”的意义为：标准状态下测得的体积且其体积单位为立方米，简称“标准立方米”，另有说明的除外。

## 5 总则

### 5.1 余热锅炉能量平衡系统

5.1.1 余热锅炉能量平衡关系，如图 1 所示。

5.1.2 输入热量（余热资源中所含的可燃物质完全燃烧后放出的热量+余热资源的显热）等于输出热水的有效热量或输出蒸汽的有效热量加上各项损失热量之和（排烟热损失+可燃气体不完全燃烧热损失+可燃固体不完全燃烧热损失+炉体散热损失+其他热损失）。

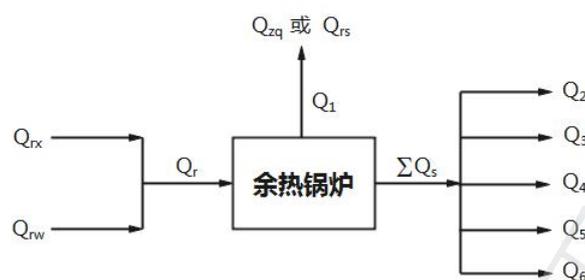


图 1 余热锅炉能量平衡系统

## 5.2 性能试验的主要内容

5.2.1 锅炉的余热利用率：锅炉有效利用回收生产工艺过程中排出的具有高于环境温度的气态、液态、固态物质所载有的热能，并加以利用的能量与其总能量之比。

5.2.2 出力试验：测试锅炉的有效输出热量。

5.2.3 汽—水品质：锅炉用水及通过加热后所产生蒸汽冷凝水的品质。

5.2.4 烟气特性：烟气中氧气、一氧化碳、二氧化碳、一氧化氮、二氧化氮、二氧化硫等气体体积或质量分数。

5.2.5 其他有关的运行特性，如汽温及其调节范围、排烟温度、烟气流动阻力、漏风量，以及汽—水的压降等。

5.2.6 余热锅炉余热利用率可用两种方法测得，即正平衡法和反平衡法。直接测量输入热量和输出热量来确定锅炉热效率的方法称作正平衡，也称直接测量法或输入输出法。通过测量各种燃烧产物热损失和锅炉散热损失来确定锅炉热效率的方法称作反平衡，也称间接测量法、热损失法或能量平衡法。[来源 GB/T10180-2017]

5.2.7 规定余热锅炉周围环境的空气温度为各项输入与输出热量的起算点，即基准温度。

## 6 试验准备

### 6.1 试验大纲至少应包括如下的内容

6.1.1 试验目的和要求；

6.1.2 锅炉热平衡系统边界、测量项目、测量方法及要求；

6.1.3 测点布置与所需仪器、仪表；

6.1.4 人员组织与分工；

6.1.5 试验数据记录与处理；

6.1.6 试验进度及日程安排；

6.1.7 其他。

### 6.2 试验前的要求

6.2.1 试验所用仪表应是在检定或校准有效期内的合格仪表；

6.2.2 试验用仪器仪表的安装应符合试验要求及相应仪器仪表的安装要求；

6.2.3 受试锅炉及辅机设备的运行状况应符合试验要求；

6.2.4 受试锅炉的汽、水等系统应符合试验要求。

### 6.3 预备性试验的要求

- 6.3.1 试验人员应熟悉试验过程和操作程序并在试验过程中相互配合；
- 6.3.2 余热锅炉汽水系统应严密、无泄漏、烟风系统应消除不正常的泄漏；
- 6.3.3 经调整确定余热锅炉主、辅机运转正常。余热资源的主工艺流程生产正常、稳定，余热资源如为周期变化时，变化规律应正常；
- 6.3.4 试验用仪器仪表应工作正常；
- 6.3.5 预备性试验的试验条件、试验内容和试验要求应与正式试验相同；如预备性试验能满足正式试验全部要求，经双方确认，可作为正式试验的一个工况。

## 7 试验要求

### 7.1 定型试验

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

### 7.2 试验工况要求

7.2.1 过热蒸汽温度的最大允许波动范围应符合表 2 要求。

表 2 过热蒸汽温度的最大允许波动范围

参数名称		允许偏差	要求
过热蒸汽温度 °C	≤250	-20°C, +30°C	每个试验工况中，实测的过热蒸汽温度的最大值与最小值之差不应大于 15°C
	>250 ~ 350	-20°C, +20°C	
	>350 ~ 400	-20°C, +10°C	
	>400	-15°C, +5°C	

### 7.3 热效率折算及要求

7.3.1 蒸汽锅炉的实际给水温度与设计值的偏差宜控制在+30°C~-20°C之间。当实际给水温度与设计值的偏差超过-20°C时，测得的锅炉热效率应按每相差-60°C热效率值下降 1 个百分点进行折算，大于或小于-60°C，则按比例折算，并在试验结果分析中对此予以扣除。

7.3.2 热水锅炉的进水温度和出水温度与设计值的偏差不宜超过±5°C。当实际出水温度平均值与设计值的偏差超过-5°C时，应对测得的锅炉热效率进行折算。

7.3.3 试验时热水锅炉的压力应保证出水温度比该压力下的饱和温度至少低 20°C；

7.3.4 试验期间余热锅炉安全阀不得起跳，不得进行可能干扰试验工况的任何操作，如定期排污、吹灰等。连续排污一般亦应关闭。对过热蒸汽锅炉，当必须连续排污时，连续排污量应计量（计入炉水取样量内），其总量不得超过锅炉出力的 3%；

7.3.5 余热锅炉验收试验的余热资源应符合设计要求。

### 7.4 试验时间和次数

7.4.1 余热资源为连续稳定时，试验持续时间每次不少于 4h；

7.4.2 余热资源为间断、且供热周期少于 4h 时，每次试验不少于两个连续周期，累计试验时间不少于 4h；

7.4.3 余热锅炉新产品定型试验的试验次数不应少于两次，其他目的试验次数可协商而定。

## 7.5 蒸发量修正方法

定型试验时蒸汽锅炉每个试验工况的平均折算蒸发量应为锅炉额定蒸发量的 97%~105%。当蒸汽和给水的实测参数与设计不一致时，余热锅炉的蒸发量可按式（1）或式（2）进行修正：

饱和蒸汽余热锅炉：

$$D_{ZS} = D \frac{h_{bq} - h_{gs}}{h \cdot_{bq} - h \cdot_{gs}} \dots\dots\dots(1)$$

过热蒸汽余热锅炉：

$$D_{ZS} = D \frac{h_{gq} - h_{gs}}{h \cdot_{gq} - h \cdot_{gs}} \dots\dots\dots(2)$$

式中：

$D_{ZS}$  ——折算蒸发量，单位为吨每小时（t/h）；

$D$  ——实测蒸发量，单位为吨每小时（t/h）；

$h_{gq}$ ， $h_{bq}$ ， $h_{gs}$  ——过热蒸汽、饱和蒸汽、给水的实测参数下的焓，单位为千焦每千克（kJ/kg）；

$h \cdot_{gq}$ ， $h \cdot_{bq}$ ， $h \cdot_{gs}$  ——过热蒸汽、饱和蒸汽、给水的设计参数下的焓，单位为千焦每千克（kJ/kg）。

## 7.6 试验数据记录

- 7.6.1 工质流量采用累计（积）方法确定时，应每不大于 30min 读数并记录一次；
- 7.6.2 热水锅炉进、出口工质温度，应每不大于 5min 读数并记录一次；
- 7.6.3 蒸汽温度、压力、排烟温度，应每不大于 15min 读数并记录一次；
- 7.6.4 蒸汽湿度和含盐量，应每不大于 15min 读数并记录一次；
- 7.6.5 其他测量项目，应每不大于 15min 读数并记录一次。

## 7.7 热效率试验结果的允许偏差

- 7.7.1 余热资源连续稳定的余热锅炉，两次试验结果之差不大于 5 个百分点（5%）；
- 7.7.2 余热资源为周期性的余热锅炉，两次试验结果之差不大于 6 个百分点（6%）；
- 7.7.3 试验受各种条件限制的场合，经试验各方认可，可按协议认可的允许偏差。

## 8 计算公式

### 8.1 余热锅炉热平衡按式（3）或式（4）计算：

$$Q_r = Q_1 + \sum Q_i \dots\dots\dots(3)$$

$$Q_{rx} + Q_{rw} = Q_{rs} + Q_{zq} + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 \dots\dots\dots(4)$$

式中：

$Q_r$  ——输入热量，单位为千焦每小时（kJ/h）；

$Q_1$  ——有效输出热量，单位为千焦每小时（kJ/h）；

$\sum Q_i$  ——各项损失热量之和，单位为千焦每小时（kJ/h）；

- $Q_{rx}$  ——余热资源的显热，单位为千焦每小时 (kJ/h)；  
 $Q_{rw}$  ——可燃物质完全燃烧后放出的热量，单位为千焦每小时 (kJ/h)；  
 $Q_{rs}$  ——输出热水的有效热量，单位为千焦每小时 (kJ/h)；  
 $Q_{zq}$  ——输出蒸汽的有效热量，单位为千焦每小时 (kJ/h)；  
 $Q_2$  ——排烟损失热量，单位为千焦每小时 (kJ/h)；  
 $Q_3$  ——可燃气体不完全燃烧损失热量，单位为千焦每小时 (kJ/h)；  
 $Q_4$  ——可燃固体不完全燃烧损失热量，单位为千焦每小时 (kJ/h)；  
 $Q_5$  ——炉体散热损失热量，单位为千焦每小时 (kJ/h)；  
 $Q_6$  ——其他损失热量，即以固体或液体的显热形式排出余热锅炉的热量，单位为千焦每小时 (kJ/h)。

## 8.2 余热利用率按式 (5) 或式 (6) 计算：

$$\varepsilon = \frac{Q_1}{Q_r} \times 100 \quad \text{..... (5)}$$

$$\varepsilon = 100 - q_2 - q_3 - q_4 - q_5 - q_6 \quad \text{..... (6)}$$

式中：

$\varepsilon$  ——余热利用率，%；

$q_2$  ——排烟热损失，%，按式 (7) 计算：

$$q_2 = \frac{Q_2}{Q_r} \times 100 \quad \text{..... (7)}$$

$q_3$  ——可燃气体不完全燃烧热损失，%，按式 (8) 计算：

$$q_3 = \frac{Q_3}{Q_r} \times 100 \quad \text{..... (8)}$$

$q_4$  ——可燃固体不完全燃烧热损失，%，按式 (9) 计算：

$$q_4 = \frac{Q_4}{Q_r} \times 100 \quad \text{..... (9)}$$

$q_5$  ——炉体散热损失，%，可按式 (10) 计算，或按附录 A 求得：

$$q_5 = \frac{Q_5}{Q_r} \times 100 \quad \text{..... (10)}$$

$q_6$  ——其他热损失，%，按式 (11) 计算：

$$q_6 = \frac{Q_6}{Q_r} \times 100 \quad \text{..... (11)}$$

## 8.3 有效输出热量的计算公式

### 8.3.1 有效输出热量为蒸汽的余热锅炉

a) 有蒸汽过热器的余热锅炉的有效输出热量按式 (12) 计算:

$$Q_1 = (G_{gs} - D_{zy} - G_s)(h_{gq} - h_{gs}) + D'_{zq}(h''_{zq} - h'_{zq}) + D_{zj}(h''_{zj} - h_{zj}) + D_{zy}(h_{zy} - h_{gs} - \frac{\gamma\omega}{100}) + G_s(h_{bq} - \gamma - h_{gs}) \dots (12)$$

式中:

- $G_{gs}$  —— 给水流量, 单位为千克每小时 (kg/h);
- $D_{zy}$  —— 自用蒸汽流量, 单位为千克每小时 (kg/h);
- $G_s$  —— 炉水取样量, 单位为千克每小时 (kg/h);
- $h_{gq}$  —— 过热器出口蒸汽的热焓, 单位为千焦每千克 (kJ/kg);
- $h_{gs}$  —— 锅炉给水的焓, 单位为千焦每千克 (kJ/kg);
- $D'_{zq}$  —— 再热器入口蒸汽流量, 单位为千克每小时 (kg/h);
- $h''_{zq}$  —— 再热器出口蒸汽的热焓, 单位为千焦每千克 (kJ/kg);
- $h'_{zq}$  —— 再热器进口蒸汽的热焓, 单位为千焦每千克 (kJ/kg);
- $D_{zj}$  —— 再热蒸汽减温水流量, 单位为千克每小时 (kg/h);
- $h_{zj}$  —— 再热蒸汽减温水热焓, 单位为千焦每千克 (kJ/kg);
- $h_{zy}$  —— 自用蒸汽的热焓, 单位为千焦每千克 (kJ/kg);
- $\gamma$  —— 炉水的汽化潜热, 单位为千焦每千克 (kJ/kg);
- $\omega$  —— 饱和蒸汽湿度, %;
- $h_{bq}$  —— 饱和蒸汽的热焓, 单位为千焦每千克 (kJ/kg)。

式 (13) 适用于一次再热, 以喷水减温方式调温的机组。对于多次再热机组, 应加入其余各级再热器吸收的热量。

b) 饱和蒸汽余热锅炉的有效输出热量按式 (13) 计算:

$$Q_1 = G_{gs} \left( h_{bq} - h_{gs} - \frac{\gamma\omega}{100} \right) - G_s \gamma \dots (13)$$

式中:

$G_{gs}$  —— 给水流量, 单位为千克每小时 (kg/h)。

热水余热锅炉的有效输出热量按式 (14) 计算:

$$Q_1 = G (h_{cs} - h_{js}) \dots (14)$$

式中:

- $G$  —— 热水流量, 单位为千克每小时 (kg/h);
- $h_{cs}$  —— 热水锅炉出水热焓, 单位为千焦每千克 (kJ/kg);
- $h_{js}$  —— 热水锅炉进水热焓, 单位为千焦每千克 (kJ/kg)。

8.4 输入热量按式 (15) 计算:

$$Q_r = Q_{rx} + Q_{rw} \dots (15)$$

对气体余热资源的输入热量按式 (16) 计算:

$$Q_r = V [C_r(t_r - t_k) + Q_{net.ar}] \dots (16)$$

式中:

$V$  —— 标准状态下的气体体积流量, 单位为立方米每小时 (m<sup>3</sup>/h);

- $C_r$  ——余热资源的比热，单位为千焦每立方米摄氏度[kJ/(m<sup>3</sup>·°C)]；  
 $t_r$  ——余热资源的温度，单位为摄氏度（°C）；  
 $t_k$  ——基准温度，单位为摄氏度（°C）；  
 $Q_{net.ar}$  ——余热资源中所含的可燃物质的收到基低位发热量，单位为千焦每立方米（kJ/m<sup>3</sup>），按式（17）计算：

$$Q_{net.ar} = 126.36CO + 107.98H_2 + Q_{qt} \quad \text{..... (17)}$$

式中：

$CO$  ——余热资源中  $CO$  含量，%；

$H_2$  ——余热资源中  $H_2$  含量，%；

$Q_{qt}$  ——余热资源中所含的其他可燃气体的发热量，单位为千焦每立方米（kJ/m<sup>3</sup>）。

常见气体密度与发热量见附录 B，常用气体平均定压容积比热见附录 C。

对液体或固体余热资源的输入热量按式（18）计算：

$$Q_r = B[C_r(t_r - t_k) + Q_{net.ar}] \quad \text{..... (28)}$$

式中：

$B$  ——单位时间内液体或固体余热资源的质量，单位为千克每小时（kg/h）；

$C_r$  ——余热资源的比热，单位为千焦每千克摄氏度[kJ/(kg·°C)]；

$Q_{net.ar}$  ——余热资源中所含的可燃物质的收到基低位发热量，单位为千焦每千克（kJ/kg）。

## 8.5 各项热损失的计算公式

### 8.5.1 排烟损失热量按式（19）计算：

$$Q_2 = C_{yc} V_{yc} (t_{yc} - t_k) \quad \text{..... (19)}$$

式中：

$C_{yc}$  ——排烟平均定压比热，单位为千焦每立方米摄氏度[kJ/(m<sup>3</sup>·°C)]；

$V_{yc}$  ——余热锅炉出口烟气体积流量，单位为立方米每小时（m<sup>3</sup>/h）；

$t_{yc}$  ——余热锅炉出口烟气温度，单位为摄氏度（°C）。

### 8.5.2 可燃气体不完全燃烧损失热量按式（20）计算：

$$Q_3 = [126.36(CO)_d + 107.98(H_2)_d + (Q_{qt})_{yc}] V_{yc}^g \quad \text{..... (20)}$$

式中：

$Q_3$  ——烟气中可燃气体不完全燃烧损失热量，单位为千焦每小时（kJ/h）；

$(CO)_d$  ——干烟气中  $CO$  体积百分数，%；

$(H_2)_d$  ——干烟气中  $H_2$  体积百分数，%；

$(Q_{qt})_{yc}$  ——余热锅炉出口烟气中其他可燃气体的发热量，单位为千焦每立方米（kJ/m<sup>3</sup>）；

$V_{yc}^g$  ——余热锅炉出口干烟气体积流量，单位为立方米每小时（m<sup>3</sup>/h）。

### 8.5.3 可燃固体不完全燃烧损失热量按式（21）计算：

$$Q = 3.3727 \times 10^{-2} \mu V \quad \text{..... (21)}$$

式中：

$\mu$  ——烟气中含碳量，单位为毫克每立方米（mg/m<sup>3</sup>）。

8.5.4 炉体散热损失热量按式 (22) 或式 (23) 计算:

$$Q = A\alpha(t - t_b) \dots\dots\dots (22)$$

$$Q_5 = \frac{q_5}{100} Q_r \dots\dots\dots (23)$$

式中:

$A$  ——炉体散热表面积, 单位为平方米 ( $\text{m}^2$ );

$\alpha$  ——自然对流条件下的炉体放热系数, 单位为千焦每平方米小时摄氏度 [ $\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$ ];

$t_b$  ——炉体平均壁面温度, 单位为摄氏度 ( $^\circ\text{C}$ )。

8.5.5 其他损失热量按式 (24) 计算:

$$Q_6 = C_z \mu_z (t_z - t_k) \dots\dots\dots (24)$$

式中:

$Q_6$  ——其他损失热量, 即以固体或液体的显热形式排出余热锅炉的热量, 单位为千焦每小时 ( $\text{kJ}/\text{h}$ )。

$C_z$  ——固体或液体比热, 单位为千焦每千克摄氏度 [ $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ ];

$\mu_z$  ——固体或液体的重量, 单位为千克每小时 ( $\text{kg}/\text{h}$ );

$t_z$  ——固体或液体的温度, 单位为摄氏度 ( $^\circ\text{C}$ );

$t_k$  ——基准温度, 单位为摄氏度 ( $^\circ\text{C}$ )。

## 8.6 烟气体积流量计算公式

8.6.1 余热锅炉进、出口有平直管段时, 烟气体积可用直接测量法测量, 烟气体积按式 (25) 计算:

$$V_y = 9.6995 F \omega \frac{P_d - P_j}{273 + t_y} \dots\dots\dots (25)$$

式中:

$V_y$  ——烟气体积流量, 单位为立方米每小时 ( $\text{m}^3/\text{h}$ );

$F$  ——烟道截面积, 单位为平方米 ( $\text{m}^2$ );

$\omega$  ——烟气流动速度, 单位为米每秒 ( $\text{m}/\text{s}$ ), 按式 (26) 计算:

$$\omega = 1.4142 K \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho}} \dots\dots\dots (26)$$

式中:

$K$  ——动压测量管校准系数;

$\Delta P$  ——烟气平均动压, 单位为帕 ( $\text{Pa}$ ), 按式 (27) 计算:

$$\Delta P = \left[ \frac{1}{n} (\sqrt{\Delta P_1} + \sqrt{\Delta P_2} + \dots + \sqrt{\Delta P_n}) \right]^2 \dots\dots\dots (27)$$

式中:

$\Delta P_1, \Delta P_2, \dots, \Delta P_n$  ——第 1 测点、第 2 测点、...、第  $n$  测点动压, 单位为帕 ( $\text{Pa}$ );

$\rho$  ——烟气工作状态下的密度, 单位为千克每立方米 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ), 按式 (28) 计算:

$$\rho = 2.6943 \times 10^{-3} \rho_0 \frac{P_d + P_j}{273 + t_y} \dots\dots\dots (28)$$

$\rho_0$  ——烟气标准状态下的密度，单位为千克每立方米 ( $\text{kg/m}^3$ )，按式 (29) 计算：

$$\rho_0 = 1.9771 \frac{CO_2}{100} + 1.4291 \frac{O_2}{100} + \dots + 1.2504 \frac{N_2}{100} \dots \dots \dots (29)$$

式中：

$CO_2$  ——烟气中  $CO_2$  含量，%；

$O_2$  ——烟气中  $O_2$  含量，%；

$N_2$  ——烟气中  $N_2$  含量，%；

$P_d$  ——当地大气压，单位为帕 (Pa)；

$P_j$  ——烟道测速点处静压，单位为帕 (Pa)；

$t_y$  ——烟气温度，单位为摄氏度 ( $^{\circ}\text{C}$ )。

8.6.2 只能直接测量余热锅炉进口 (或出口) 烟气体积时，可通过测量漏入空气量计算出口 (或进口) 的烟气体积。

8.6.2.1 当能测量进口烟气体积时，出口烟气体积按式 (30) 计算：

$$V_{yc} = V_{yj} + V_{qt} \dots \dots \dots (30)$$

式中：

$V_{yj}$  ——余热锅炉进口烟气体积流量，单位为立方米每小时 ( $\text{m}^3/\text{h}$ )；

$V_{qt}$  ——余热锅炉区间漏入空气量，单位为立方米每小时 ( $\text{m}^3/\text{h}$ )，按式 (31) 计算：

$$V_{qt} = \frac{(V_{yj} - V_{H_2O_j})[(O_2)_{dc} - (O_2)_{dj}]}{20.657 - 0.984(O_2)_{dc}} \dots \dots \dots (41)$$

$V_{H_2O_j}$  ——余热锅炉进口烟气中水蒸气体积，单位为立方米每小时 ( $\text{m}^3/\text{h}$ )，按式 (32) 计算：

$$V_{(H_2O)_j} = \frac{(H_2O)_j}{100} V_{yj} \dots \dots \dots (32)$$

式中：

$(H_2O)_j$  ——余热锅炉进口烟气中水蒸气体积百分数，%；

$(O_2)_{dc}$  ——余热锅炉出口干烟气中  $O_2$  体积百分数，%；

$(O_2)_{dj}$  ——余热锅炉进口干烟气中  $O_2$  体积百分数，%。

8.6.2.2 当能测量出口烟气体积时，进口烟气体积可按式 (33) 计算：

$$V_{yj} = V_{yc} - V_{ql} \dots \dots \dots (33)$$

式中：

$V_{yj}$  ——余热锅炉进口烟气体积流量，单位为立方米每小时 ( $\text{m}^3/\text{h}$ )；

$V_{yc}$  ——余热锅炉出口烟气体积流量，单位为立方米每小时 ( $\text{m}^3/\text{h}$ )；

$V_{ql}$  ——余热锅炉区间漏入空气量，单位为立方米每小时 ( $\text{m}^3/\text{h}$ )，按式 (34) 计算：

$$V_{ql} = \frac{(V_{yc} - V_{(H_2O)_c})[(O_2)_{dc} - (O_2)_{dj}]}{20.657 - 0.984(O_2)_{dj}} \dots \dots \dots (34)$$

$V_{H_2O_c}$  ——余热锅炉出口烟气中水蒸气体积，单位为立方米每小时 ( $\text{m}^3/\text{h}$ )，按式 (35) 计算：

$$V_{(H_2O)_c} = \frac{(H_2O)_c}{100} V_{yc} \dots\dots\dots(35)$$

式中：

- ( $H_2O$ )<sub>c</sub> ——余热锅炉出口烟气中水蒸气体积百分数，%；
- ( $O_2$ )<sub>dc</sub> ——余热锅炉出口干烟气中  $O_2$  体积百分数，%；
- ( $O_2$ )<sub>dj</sub> ——余热锅炉进口干烟气中  $O_2$  体积百分数，%。

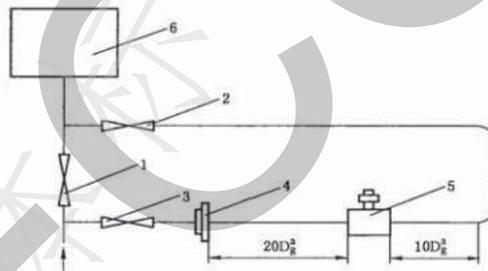
8.6.2.3 当没有条件直接测量时，进口烟气体积也可由主工艺计算得到。

## 9 测量方法和测量装置

### 9.1 余热锅炉蒸汽和给水流量测量

9.1.1 余热锅炉蒸发量可采用测量给水流量法来确定。采用给水流量法测量时，锅筒的水位在试验开始时和试验结束时应保持一致，如不一致应进行修正。当采用喷水减温的调温方式，有减温水时，减温水的流量也应考虑进去，采用的流量计应适应被测工质的温度要求，测点通常布置在给水泵后给水管道的直段上，并尽量与给水温度和给水压力测点处于同一区域。

9.1.2 给水（或进水）流量可使用 LW 型涡轮流量变送器测量，变送器精度不低于 0.5 级。也可采用电磁流量计（精度不低于 0.5 级）、孔板流量计（精度不低于 1.5 级）、涡轮流量计（精度不低于 1.5 级）和超声波流量计（精度不低于 1.5 级）来测量给水流量。并允许使用系统中已存在的经过标定的流量计。测量装置如图 2 所示，流量计的安装也可按照流量计说明书的要求进行。



说明：

- 1、2、3 —— 截止阀；
- 4 —— 过滤器；
- 5 —— LW 型涡轮流量变送器；
- 6 —— 余热锅炉；
- D —— 给水旁路的公称直径。

图 2 测量装置

9.1.3 采用水箱给水的余热锅炉给水（或进水）流量也可用水箱容积法和称重法测量，采用容器测量时，其上应带有液位计。容器应经过验证，且误差不应低于流量计的精度要求。

水的体积流量应按式（36）换算为质量流量：

$$G_{gs} = \frac{V_s}{1000} \times \rho_{H_2O} \dots\dots\dots(36)$$

式中：

- $G_{gs}$  —— 给水（或进水）的质量流量，单位为千克每小时（kg/h）；
- $V_s$  —— 给水（或进水）的体积流量，单位为升每小时（L/h）；

$\rho_{H_2O}$ ——给水（或进水）的密度，单位为千克每立方米（ $\text{kg/m}^3$ ）。

9.1.4 过热蒸汽余热锅炉蒸发量也可采用直接测量蒸汽流量来确定。测量方法可用孔板或喷嘴流量计（系统精度不低于 1.5 级）。

蒸汽流量仪表如无密度修正功能时，所测蒸汽流量应按式（37）进行蒸汽密度修正：

$$D_x = D_z \sqrt{\frac{\rho}{\rho'}} \dots\dots\dots(37)$$

式中：

$D_x$ 、 $D_z$  ——分别为修正后的和仪表指示的蒸汽质量流量，单位为千克每小时（ $\text{kg/h}$ ）；

$\rho$ 、 $\rho'$  ——分别为测量状态和设计状态下的蒸汽密度，单位为千克每立方米（ $\text{kg/m}^3$ ）。

## 9.2 汽水系统压力测量

应采用精度不低于 1.0 级的压力表，也可采用就地安装或表盘上的压力表，试验前应校验合格。

## 9.3 蒸汽与炉水取样点选择

9.3.1 蒸汽取样点宜安装在余热锅炉主汽阀后垂直的直管段处，在条件不允许时，也可安装在水平直管段处，这时取样管要垂直安装，并向下引出蒸汽。

9.3.2 炉水取样点可选择在水位计下方或锅筒定期排污管处。

9.3.3 蒸汽与炉水取样都应经过冷却器冷却后引出。

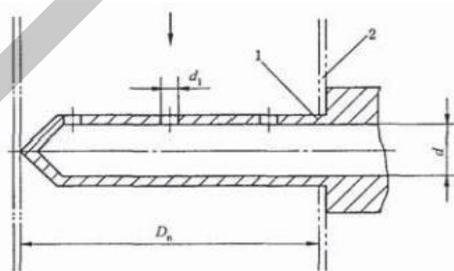
## 9.4 蒸汽品质测量

9.4.1 饱和蒸汽湿度可采用氯离子浓度滴定法、钠离子浓度计或电导率仪法测定，每次测定时炉水试样和蒸汽试样的温度应相同。采用氯离子浓度滴定法测定饱和蒸汽湿度时应符合附录 D 的要求。

9.4.2 过热蒸汽含盐量采用钠离子浓度计测量。

## 9.5 蒸汽取样器

推荐取样器结构如图 3 所示。取样孔流通总面积不应超过取样管流通面积的 50%，即符合式（38）规定：



说明：

1——蒸汽取样头；

2——蒸汽管道（ $d_n$ 为蒸汽管道内径，箭头为蒸汽流动方向）。

图 3 取样器结构

$$n \frac{\pi d_1^2}{4} < 0.5 \frac{\pi d^2}{4} \dots\dots\dots(38)$$

式中：

$n$  —— 取样孔数，一般不小于 3；

$d_1$  —— 取样孔孔径，一般为 3mm 以上；

$d$  —— 取样管的内径，单位为毫米（mm）。

## 9.6 取样量

蒸汽取样应遵循等速取样原则，即取样量应满足式（39）：

$$G_x = nD_G \left( \frac{d_1}{d_n} \right)^2 \dots\dots\dots (39)$$

式中：

$G_x$  —— 蒸汽取样量，单位为千克每小时（kg/h）；

$n$  —— 取样孔数；

$D_G$  —— 蒸汽管道内的蒸汽流量，单位为千克每小时（kg/h）；

$d_1$  —— 取样孔孔径，单位为毫米（mm）；

$d_n$  —— 蒸汽管道的内径，单位为毫米（mm）。

## 9.7 温度测量

9.7.1 过热蒸汽温度的测量，二次仪表的精度不低于 0.5 级，一次仪表的精度不低于 1 级。

9.7.2 热水余热锅炉的进、出水温度，测量仪表的测量精度应达到 0.2℃。

9.7.3 蒸汽余热锅炉给水温度，测量仪表的精度等级应达到 1 级。

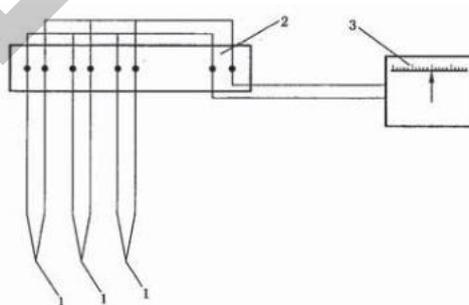
## 9.8 烟气温度采用热电偶温度计测量

9.8.1 烟温测点应视烟道截面的大小，按表 3、表 4 规定布置，烟气温度一般取其各测点读数的算术平均值。当测量截面处烟气流速偏差较大时，应取各测点读数的加权平均值。

9.8.2 热电偶头部应裸露于气流中，且热电偶的精度不低于 1 级。若用补偿导线，应用同型号的补偿导线引至温度较稳定的室温处，两根补偿导线与热电偶的连接点应处于同一温度。

9.8.3 二次仪表的精度不低于 0.5 级。

为简化平均温度的测量，平均温度可用几支特性相同的热电偶并联测量，如图 4 所示。



说明：

1 —— 热电偶；

2 —— 接线端子板；

3 —— 二次仪表。

图 4 平均温度的测量

9.8.4 空气温度的测量可采用普通棒式玻璃温度计，测量时应避免其他热源对其造成的辐射影响。

9.8.5 余热锅炉本体及部件外表面散热损失测量与计算应按附录 A 的规定进行。

### 9.9 动压测量

当用动压测量管测量动压时，测量截面前应有  $4d_o \sim 7d_o$  的直管段，测量截面后应有  $1d_o \sim 2d_o$  的直管段， $d_n$  为管道的内径；对矩形通道，以当量直径  $d_n$  代替  $d_o$ ，当量直径按式 (40) 计算，如不能满足上述要求时，则应增加测量点数。

$$d_n = \frac{2 \times L_1 \times L_2}{L_1 + L_2} \dots\dots\dots (40)$$

式中：

$d_n$ ——管道的内径，单位为毫米 (mm)；

$L_1$ ——矩形截面边长，单位为毫米 (mm)；

$L_2$ ——矩形截面边长，单位为毫米 (mm)；

### 9.10 测量截面上测点的布置

#### 9.10.1 圆形截面的管道

将圆形截面的管道分成  $n$  个面积相等的同心圆环，再把每个圆环分成两个面积相等的部分，动压测点就设在这两部分的分界线上，如图 5 所示。

测点距中心的距离按式 (41) 计算：

$$r_1 = R\sqrt{\frac{1}{2n}} \quad r_2 = R\sqrt{\frac{3}{2n}} \quad r_3 = R\sqrt{\frac{5}{2n}} \quad \dots\dots \quad r_i = R\sqrt{\frac{2i-1}{2n}} \dots\dots\dots (41)$$

式中：

$r_1、r_2、r_3 \dots \dots r_i$ ——各测点距中心的距离，单位为毫米 (mm)；

$R$ ——烟道半径，单位为毫米 (mm)。

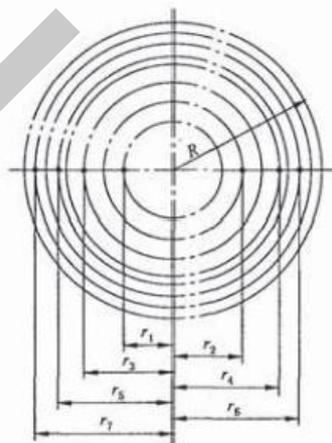


图 5 圆形截面的管道

#### 9.10.2 矩形截面的管道

用经纬线将矩形管道分成若干面积相等的小矩形，如图 6 所示，各小矩形的对角线交点就成为动

压测量点。

### 9.10.3 测量点最小数的规定

圆形管道等面积环数与布置测点的测量直径数见表 3。当测量直径数为 2 时，该两条直径线应互相垂直。

矩形截面的测点排数见表 4。

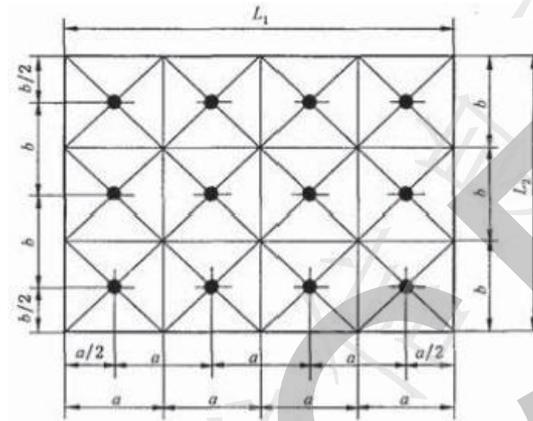


图 6 矩形截面的管道

表 3 圆形管道等面积环数与布置测点的测量直径数

管道内径 $d_n$ (mm)	300	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2.000
等面积环数	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
测量直径数	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2
测量点总数	6	8	20	24	28	32	36	40	44	48

表 4 矩形截面的测点排数

矩形管道边长 $L$ (mm)	$\leq 500$	>500~ 1.000	>1.000 ~1500	>1500 ~2.000	>2.000 ~2500	>2500
测点排数 $N$	3	4	5	6	7	$L$ 每增加 500 测点 排 数 $N$ 增加 1

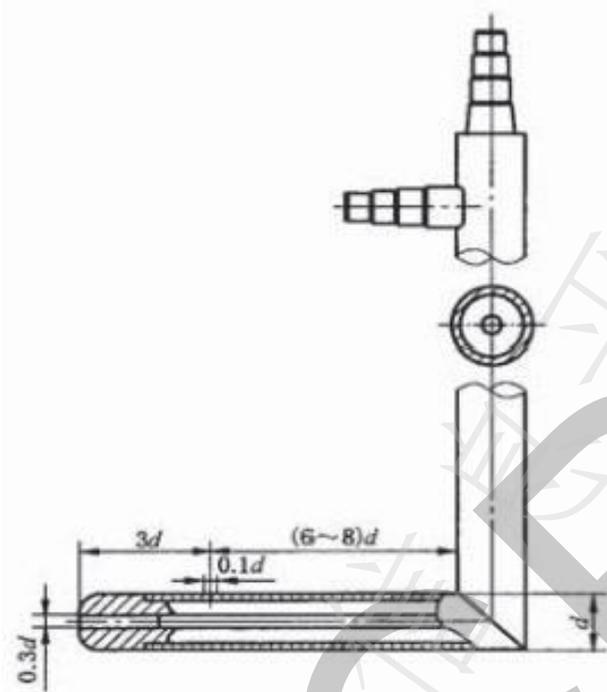


图7 标准皮托管

### 9.11 动压测量管

9.11.1 非含尘气体可用标准皮托管测量，标准皮托管见图7；

9.11.2 含尘气体采用图8或图9所示的动压测量管测量。

动压测量管制造后应经校准，确定其校准系数K。校准系数K的测量装置及计算公式应符合附录E的要求。



图8 动压测量管

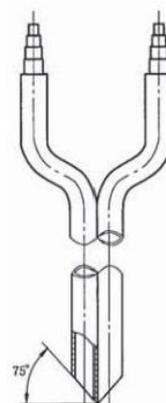


图9 动压测量管

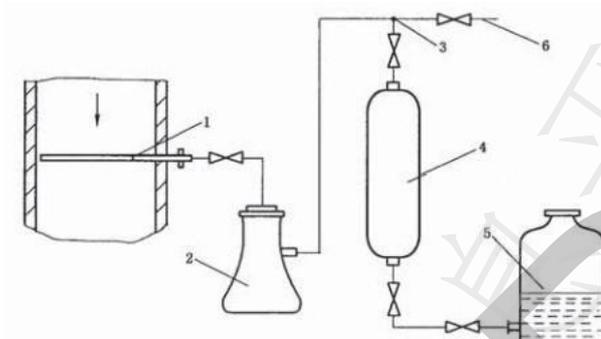
### 9.12 测压计

9.12.1 烟道静压可采用U型压力计测量；

9.12.2 动压测量应采用精度为0.5级的倾斜式微压计，也可采用电子微压计测量，其精度不低于1.0级。

### 9.13 气体成分测量

- 9.13.1 气体取样点应选择在气流均匀的直管段上，不应安装在烟道拐弯处及有漏风处；
- 9.13.2 气体取样管上应按等面积环原则开设若干取样孔；
- 9.13.3 可燃气体的取样系统应按图 10。取样之前应对气体取样管和通至集样器的管路进行吹扫，且应以饱和食盐水溶液充满三通旋塞到集样器这一管路。



说明：

- 1 —— 气体取样管；
- 2 —— 玻璃瓶；
- 3 —— 三通旋塞；
- 4 —— 集样器；
- 5 —— 平衡容器；
- 6 —— 吹扫管路。

图 10 可燃气体的取样系统

#### 9.14 烟气成分分析

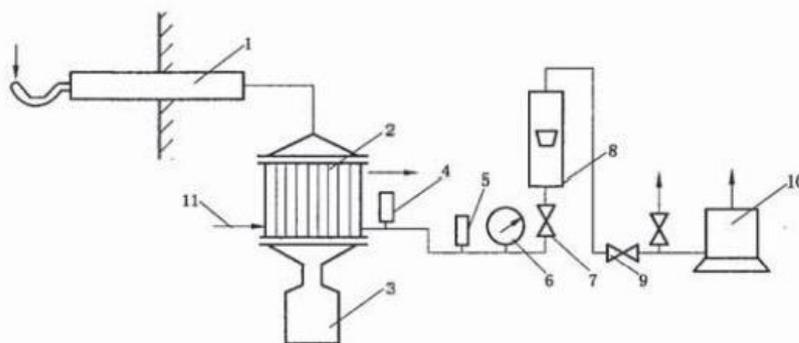
- 9.14.1 烟气中三原子气体  $RO_2$  ( $CO_2$  和  $SO_2$ )、 $O_2$  可用奥氏气体分析仪测量， $CO$  可用气体检测管测定。
- 9.14.2 烟气成分也可用烟道气分析仪进行测定，其测量精度不低于 1.0 级，试验前后应对烟道气分析仪进行校核。

#### 9.15 可燃气体的测量

可燃气体中重烃、饱和烃、氢和甲烷的含量可用 532 型气体分析仪测量。

#### 9.16 烟气中水分含量的测定

- 9.16.1 冷凝法水分含量测定装置如图 11 所示。



说明：

- 1 ——带尘粒过滤器的取样管；
- 2 ——冷凝器；
- 3 ——冷凝水收集器；
- 4 ——冷凝器后温度计；
- 5 ——流量计前温度计；
- 6 ——流量计前压力计；
- 7 ——进口流量调节阀；
- 8 ——流量计。

图 11 冷凝法水分含量测定装置

$$H_2O = \frac{460.23(273+t_q) G_w + P_v V_s}{460.23(273+t_q) G_w + (P_d + P_q) V_s} \times 100 \dots\dots\dots (42)$$

式中：

- $H_2O$  ——烟气中水分含量的体积百分数，%；
- $t_q$  ——流量计前烟气温度，单位为摄氏度（℃）；
- $G_w$  ——冷凝水量，单位为克（g）；
- $P_v$  ——由冷凝器后温度查得的饱和压力，单位为帕（Pa）；
- $V_s$  ——烟气取样量，单位为升（L）；
- $P_d$  ——当地大气压，单位为帕（Pa）；
- $P_q$  ——流量计前压力计读数，单位为帕（Pa）。

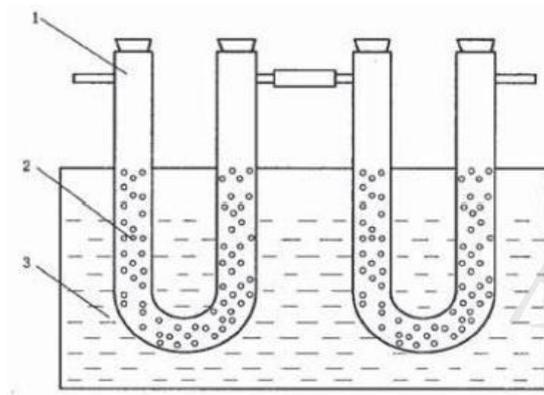
9.16.2 重量法水分含量测定装置类同图 11，只是将冷凝器改为装有吸水剂的吸水管，吸水管如图 12 所示。烟气中的水蒸气被吸水剂吸收，吸水管的增重即为已知烟气体积含有的水分。常用吸水剂有氯化钙、硅胶、氧化钙等。

烟气中水分含量的体积百分数按式（43）计算：

$$H_2O = \frac{1.24G_w(273+t_q)}{2.694 \times 10^{-3} V_s (P_d + P_q) + 1.24G_w(273+t_q)} \times 100 \dots\dots\dots (43)$$

式中：

- $H_2O$  ——烟气中水分含量的体积百分数，%；
- $G_w$  ——试验中吸水管吸收的水量，单位为克（g）；
- $t_q$  ——流量计前烟气温度，单位为摄氏度（℃）；
- $V_s$  ——烟气取样量，单位为升（L）；
- $P_d$  ——当地大气压，单位为帕（Pa）；
- $P_q$  ——流量计前压力计读数，单位为帕（Pa）。



说明:

- 1 —— 吸水管;
- 2 —— 吸水剂;
- 3 —— 冷却器。

图 12 吸水管

9.16.3 干湿球法水分含量测定装置如图 13 所示。

烟气中水分含量的体积百分数按式 (44) 计算:

$$H_2O = \frac{P_s}{P_y} \times 100 \quad \text{.....(44)}$$

式中:

$H_2O$  —— 烟气中水分含量的体积百分数, %;

$P_s$  —— 烟气中水蒸气的压力, 单位为帕 (Pa), 按式 (45) 计算:

$$P_s = P_{bv} - C (t_g - t_s) P_{sb} \quad \text{.....(45)}$$

$P_{bv}$  —— 温度为  $t$  时饱和水蒸气压力, 单位为帕 (Pa);

$C$  —— 一般约等于 0.00066 (此时要求烟气流过湿球表面时的流速大于 2.5m/s);

$t_g$  —— 干球温度, 单位为摄氏度 (°C);

$t_s$  —— 湿球温度, 单位为摄氏度 (°C);

$P_{sb}$  —— 流过湿球表面的烟气绝对压力 (等于大气压减去压力计指示压力), 单位为帕 (Pa);

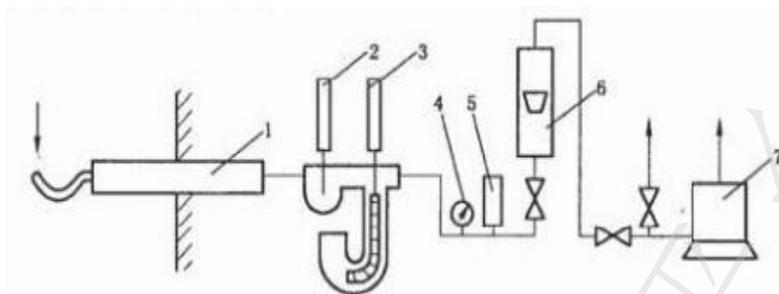
9.16.4 烟道内烟气绝对压力按式 (46) 计算:

$$P_y = P_d + P_j \quad \text{.....(46)}$$

$P_y$  —— 烟道内烟气绝对压力, 单位为帕 (Pa);

$P_d$  —— 当地大气压, 单位为帕 (Pa);

$P_j$  —— 烟道静压, 单位为帕 (Pa)。



说明：

- 1 ——带加热过滤的取样管；
- 2 ——干球温度计；
- 3 ——湿球温度计；
- 4 ——流量计前压力计；
- 5 ——流量计前温度计；
- 6 ——流量计；
- 7 ——抽气泵。

图 13 干湿球法水分含量测定装置

### 9.17 烟气含尘量测定

9.17.1 烟气中含尘量的测定装置如图 11，可与烟气中水分含量同时测定。本方法同时可用于测定炭黑浓度及飞灰取样。

9.17.2 烟气含尘量测定的取样点宜选择在垂直的直段烟道上，若没有合适的垂直的直段，也可安装在水平的直段上，但应增加测量点数，不应安装在烟道拐弯处。

9.17.3 烟气取样应遵循等速取样原则，具体方法应符合附录 F 的要求。

含尘量按式 (47) 计算：

$$\mu_h = \frac{\mu}{5.0104 \times 10^{-2} V_r t_n \frac{P_d + P_q - P_v}{\sqrt{(P_d + P_q)(273 + t_q)}}} \times 1000 \quad (47)$$

式中：

- $\mu_h$  ——烟气含尘量，单位为毫克每立方米 ( $\text{mg}/\text{m}^3$ )；
- $\mu$  ——试验期间的收尘量，单位为毫克 ( $\text{mg}$ )；
- $V_r$  ——流量计读数，单位为升每分钟 ( $\text{L}/\text{min}$ )；
- $t_n$  ——试验采样时间，单位为分钟 ( $\text{min}$ )；
- $t_q$  ——流量计前温度计读数，单位为摄氏度 ( $^{\circ}\text{C}$ )；
- $P_d$  ——当地大气压，单位为帕 ( $\text{Pa}$ )；
- $P_q$  ——流量计前压力计读数，单位为帕 ( $\text{Pa}$ )；
- $P_v$  ——流量计前饱和蒸汽压力，单位为帕 ( $\text{Pa}$ )。

### 9.18 烟尘中含碳量测定

在烟尘取样后，测得收尘量  $\mu$  ( $\text{mg}$ )，经灰化处理后测出其中的含灰量为  $\mu_A$  ( $\text{mg}$ )，烟尘中含碳量按式 (48) 计算：

$$\mu_c = \frac{\mu - \mu'_h}{5.0104 \times 10^{-2} V'_t t_n \frac{P_d + P_q - P_v}{\sqrt{(P_d + P_q)(273 + t_q)}}} \times 1000 \quad (48)$$

式中：

$\mu_c$ ——烟尘中含碳量，单位为毫克每立方米（mg/m<sup>3</sup>）；

$\mu$ ——试验期间的收尘量，单位为毫克（mg）；

$\mu'_h$ ——烟尘的含灰量，单位为毫克（mg）；

$V'_t$ ——流量计读数，单位为升每分钟（L/min）；

$t_n$ ——试验采样时间，单位为分钟（min）；

$t_q$ ——流量计前温度计读数，单位为摄氏度（℃）；

$P_d$ ——当地大气压，单位为帕（Pa）；

$P_q$ ——流量计前压力计读数，单位为帕（Pa）；

$P_v$ ——流量计前饱和蒸汽压力，单位为帕（Pa）。

## 10 试验报告

10.1 试验报告封面应包括被测锅炉的型号、试验单位名称及出具报告的时间。

### 10.2 试验报告正文包括的内容

10.2.1 余热锅炉型号；

10.2.2 余热锅炉设计单位；

10.2.3 余热锅炉制造单位；

10.2.4 余热锅炉编号；

10.2.5 试验地点；

10.2.6 试验日期；

10.2.7 试验单位；

10.2.8 试验负责人；

10.2.9 参加试验人员；

10.2.10 试验目的、要求和试验内容；

10.2.11 测点布置和测试仪器说明；

10.2.12 试验结果分析和试验结论；

10.2.13 余热锅炉设计数据综合表，参见附录 G 中表 G.1；

10.2.14 试验数据综合表，参见附录 G 中表 G.2。

附录 A  
(规范性)  
余热锅炉炉体散热损失

A.1 蒸汽余热锅炉炉体散热损失应按表 A.1 选取。

表 A.1 蒸汽余热锅炉炉体散热损失

额定蒸发量/ (t/h)	≤4	6	10	15	20	35	65
散热损失 $q_s$ /%	2.9	2.4	1.7	1.5	1.3	1.1	0.8

A.2 热水余热锅炉炉体散热损失应按表 A.2 选取。

表 A.2 热水余热锅炉炉体散热损失

额定热功率/ (MW)	≤2.8	4.2	7.0	10.5	14	29	46
散热损失 $q_s$ /%	2.9	2.4	1.7	1.5	1.3	1.1	0.8

A.3 出力小于 2t/h 及烟管余热锅炉应按式 (A.1) 计算。

$$q_s = \frac{1670A}{Q_s} \times 100 \dots\dots\dots (A.1)$$

式中:

$q_s$  ——炉体散热损失, %;

$A$  ——炉体散热表面积, 单位为平方米 ( $m^2$ );

$Q_s$  ——输入热量, 单位为千焦每小时 ( $kJ/h$ )。

附录 B  
(资料性)  
气体的密度与发热量

气体的密度与发热量如表 B.1。

表 B.1 气体的密度与发热量

名称	分子式	分子量	密度 (kg/m <sup>3</sup> )		压缩系数	低位发热量 (kJ/m <sup>3</sup> )
			理想密度	实际密度		
氢	H <sub>2</sub>	2.0160	0.0899	0.0899	1.0006	10798
一氧化碳	CO	28.0104	1.2497	1.2506	0.9993	12636
甲烷	CH <sub>4</sub>	16.0430	0.7158	0.7174	0.9977	35818
乙烷	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	30.0700	1.3416	1.3553	0.9899	64351
丙烷	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	44.0970	1.9674	2.0102	0.9787	93181
丁烷	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	58.1240	2.5932	2.6912	0.9636	123565
乙烯	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	28.0540	1.2517	1.2605	0.9930	59440
丙烯	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	42.0010	1.8775	1.9136	0.9811	87609
丁烯	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	56.1080	2.5033	2.5968	0.9640	117616
乙炔	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	26.0400	1.1709	-	-	56019
硫化氢	H <sub>2</sub> S	34.1760	1.5203	1.5363	0.9896	23367
氧	O <sub>2</sub>	31.9988	1.4277	1.4291	0.9991	-
二氧化碳	CO <sub>2</sub>	44.0098	1.9635	1.9771	0.9932	-
水蒸气	H <sub>2</sub> O	18.0154	0.8038	0.8330	0.9650	-
空气	-	28.9660	1.2923	1.2931	0.9994	-
氮	N <sub>2</sub>	28.0134	1.2498	1.2504	0.9996	-
二氧化硫	SO <sub>2</sub>	26.0600	-	2.9263	-	-
三氧化硫	SO <sub>3</sub>	80.0600	-	3.5770	-	-

## 附录 C

(资料性)

## 常用气体平均定压容积比热

常用气体平均定压容积比热见表 C.1。

表 C.1 常用气体平均定压容积比热

单位为  $\text{kJ}/\text{m}^3\cdot^\circ\text{C}$ 

T ( $^\circ\text{C}$ )	$\text{CO}_2$	$\text{N}_2$	$\text{O}_2$	$\text{H}_2\text{O}$	干空气	湿空气 ( $d=10\text{g}/\text{m}^3$ )	$\text{SO}_2$	$\text{H}_2$	$\text{CO}$	$\text{CH}_4$
0	1.5998	1.2946	1.3059	1.4943	1.2971	1.3188	1.7333	1.2766	1.2992	1.5500
100	1.7002	1.2958	1.3176	1.5052	1.3004	1.3243	1.8129	1.2908	1.3017	1.6421
200	1.7873	1.2996	1.3352	1.5223	1.3071	1.3318	1.8882	1.2971	1.3071	1.7589
300	1.8627	1.3067	1.3561	1.5424	1.3172	1.3423	1.9552	1.2992	1.3167	1.8862
400	1.9296	1.3168	1.3775	1.5654	1.3289	1.3544	2.0180	1.3021	1.3289	2.0155
500	1.9887	1.3276	1.398.0	1.5897	1.3427	1.3682	2.0683	1.3050	1.3427	2.1403
600	2.0411	1.3402	1.4168	1.6148	1.3565	1.3829	2.1143	1.3080	1.3574	2.2609
700	2.0883	1.3536	1.4344	1.6412	1.3708	1.3976	2.1520	1.3121	1.3720	2.3768
800	2.1311	1.3670	1.4499	1.6680	1.3842	1.4114	2.1813	1.3167	1.3862	2.4941
900	2.1692	1.3796	1.4645	1.6957	1.3976	1.4248	2.2148	1.3226	1.3996	2.6025
1000	2.2035	1.3917	1.4775	1.7229	1.4097	1.4373	2.2358	1.3289	1.4126	2.6992
1100	2.2349	1.4034	1.4892	1.7501	1.4214	1.4499	2.2609	1.3360	1.4248	2.7363
1200	2.2638	1.4143	1.5005	1.7769	1.4327	1.4612	2.2776	1.3431	1.4361	2.8629
1.300	2.2898	1.4252	1.5106	1.8028	1.4432	1.4725	2.2986	—	1.4465	—

## 附录 D

(规范性)

## 氯离子滴定法化学试剂配制和蒸汽湿度的测定

## D.1 溶液配制

## D.1.1 10% 铬酸钾指示剂

称取 10g 铬酸钾 ( $K_2CrO_4$ ) 溶于少量蒸馏水中并稀释至 100mL。滴加硝酸银标准溶液至出现橙色, 放置, 过滤后备用。

## D.1.2 酚酞指示剂

称取酚酞 1g, 溶于 100mL 乙醇溶液中。

## D.1.3 0.1N 硫酸标准溶液

取纯浓硫酸 2.8mL, 倒入装有 200mL 蒸馏水的烧杯中, 搅拌均匀后, 倾入玻璃瓶, 并稀释至 1L。

## D.1.4 0.1N 硝酸银标准溶液

称取分析纯硝酸银 (分子量为 166.86) 17g 放在烧杯中, 再加入蒸馏水 1L, 溶解后倾入褐色瓶中, 以备标定。可根据测定要求稀释至 0.01N 或 0.001N。

硝酸银标定方法如下:

将基准级氯化钾 (分子量 74.533) 放在瓷坩埚中, 置于高温炉内在  $450^{\circ}C \sim 500^{\circ}C$  灼热约 2h ~2.5h, 取出置于干燥器中, 冷却后, 精确称取 0.15g 氯化钾, 置于三角烧瓶中, 加蒸馏水 70mL, 用欲标定的硝酸银溶液滴定至快到终点时 (欠加硝酸银 1mL ~2mL 时), 加入铬酸钾 (饱和溶液) 或荧光红指示剂 2 滴。继续滴定至氯化银全部沉降于瓶底, 并且沉淀中一部分呈现明显粉红色时, 即为终点。

硝酸银当量浓度  $N$  按式 (D.1) 计算:

$$N = \frac{\text{氯化钾重 (g)}}{\text{氯化钾毫克当量值 (0.07456)} \times \text{硝酸根消耗量 (mL)}} \dots\dots\dots (D.1)$$

## D.2 氯离子滴定

## D.2.1 蒸汽凝结水取样量 100mL;

## D.2.2 用移液管量取炉水试样 10mL, 并用蒸馏水稀释至 100mL;

D.2.3 将两试样分别注入两只 250mL 的三角烧瓶中。分别加入 1% 酚酞指示剂 1~2 滴呈红色, 再加入 0.1N 硫酸溶液中和至无色; 若为酸性, 应用碱中和使 pH 为 7。然后加入 10% 铬酸钾指示剂数滴使溶液呈黄色, 最后用 0.01N 或 0.001N 硝酸银滴定到混浊带橙色即为终点。

记下硝酸银消耗的毫升数, 此即为蒸汽或炉水中氯根 (氯离子) 的含量。湿度是蒸汽凝结水和炉水氯离子量的比值。

$$\text{蒸汽湿度 } \omega = \frac{\text{蒸汽凝结水滴定消耗的硝酸根毫升数}}{\text{炉水滴定消耗的硝酸银毫升数}} \times 100\% \dots\dots\dots (D.2)$$

## 附录 E

(资料性)

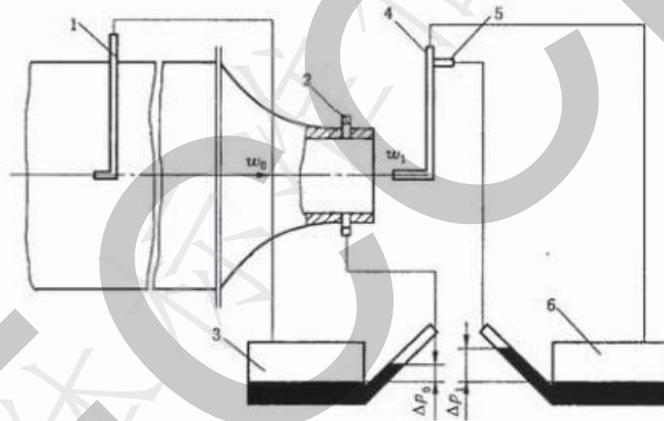
## 动压测量管的校准系数测定

E.1 吹气式校准风洞的测量装置如图 E.1 所示。

校准系数  $K$  按式 (E.1) 计算:

$$K = w_0 / w_1 = \sqrt{\Delta p_0 / \Delta p_1} \quad \text{.....(E.1)}$$

式中:

 $K$  ——被校动压测量管的校准系数; $w_0$  ——校准风洞出口处的速度, 单位为米每秒 (m/s); $w_1$  ——动压测量管校准时的速度, 单位为米每秒 (m/s); $\Delta p_0$  ——校准风洞的全压和静压之差, 单位为帕 (Pa); $\Delta p_1$  ——动压测量管的全压和静压之差, 单位为帕 (Pa)。

说明:

1 ——全压测量管;

2 ——风洞静压测管;

3、6 ——倾斜式微压计;

4 ——被校动压测量管的全压接头;

5 ——静压接头。

图 E.1 校准系数  $K$ 

E.2 吸气式校准风洞的测量装置如图 E.2 所示。

校准系数  $K$  按式 (E.2) 计算:

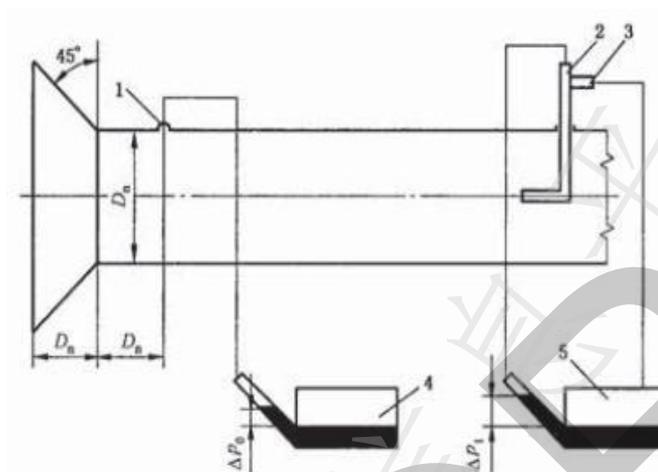
$$K = w_0 / w_1 = \sqrt{\Delta p_0 / 1.15 \Delta p_1} \quad \text{.....(E.2)}$$

式中:

 $K$  ——被校动压测量管的校准系数; $w_0$  ——校准风洞出口处的速度, 单位为米每秒 (m/s); $w_1$  ——动压测量管校准时的速度, 单位为米每秒 (m/s);

$\Delta p_0$ ——校准风洞的全压和静压之差，单位为帕（Pa）；

$\Delta p_1$ ——动压测量管的全压和静压之差，单位为帕（Pa）。



说明：

1 ——风洞静压测管；

2 ——被校动压测量管的全压接头；

3 ——静压接头；

4、5——倾斜式微压计；

$D_0$  ——风洞管道内径。

图 E. 2 吸气式校准风洞的测量装置

附录 F  
(规范性)  
烟尘的等速取样方法

### F.1 等速取样

所谓“等速取样”就是烟气进入取样管的速度  $w_n$  和烟道的速度  $w_y$  相等，即  $w_n = w_y$ ，如图 F.1 (c) 所示。

当  $w_n < w_y$  时，处于取样管边缘的尘粒在到达取样管时，其中大尘粒本应随流线绕过取样管，但由于惯性力的作用，继续按原来方向前进，于是进入了取样管，如图 F.1 (a) 所示，致使测定的含尘量高于实际情况。当  $w_n > w_y$  时，如图 F.1 (b)，与上相反，测定值偏低，所以应等速取样如图 F.1 (c)。

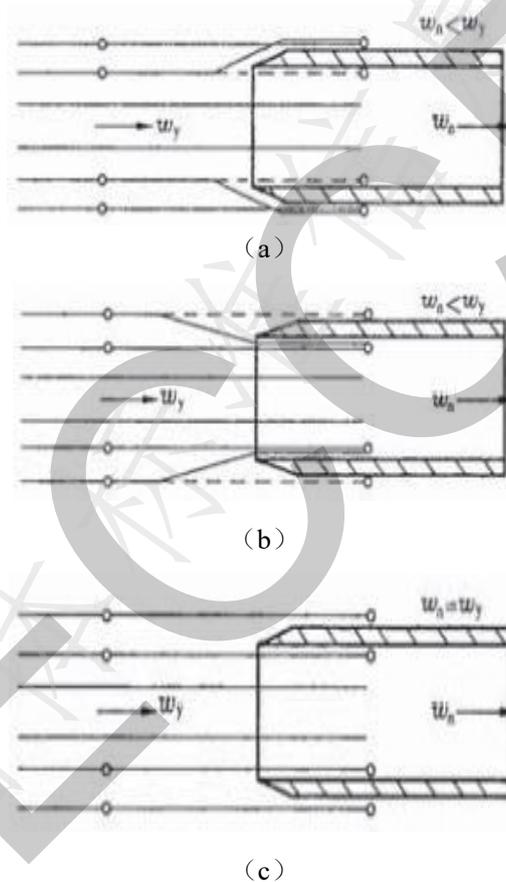


图 F.1 等速取样

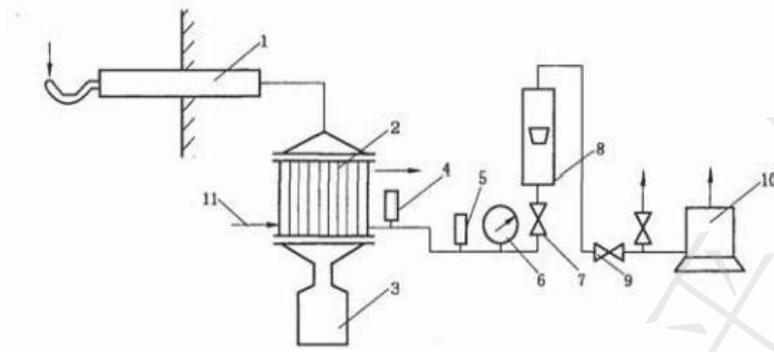
### F.2 取样方法

#### F.2.1 等速取样可以采用流量调节法

##### F.2.1.1 流量调节法

用温度计和皮托管预测烟道中烟气的温度和流速，根据已知口径的取样头尺寸，计算达到等速取样条件时的试样流量，调节取样装置的流量，使通过取样头和流量计的烟气流量为计算值，这样就可以达到等速取样的要求。

测量装置见图 F.2。



说明:

- 1 ——带尘粒过滤器的取样管;
- 2 ——冷凝器;
- 3 ——冷凝水收集器;
- 4 ——冷凝器后温度计;
- 5 ——流量计前温度计;
- 6 ——流量计前压力计;
- 7 ——进口流量调节阀;
- 8 ——流量计;
- 9 ——抽气调节阀;
- 10 ——真空泵;
- 11 ——冷却水。

图 F.2 测量装置

F.2.2 先测定烟道烟气流速  $w_y$ 、温度  $t_y$  和烟道静压  $P_j$ ，选择与真空泵流量相适应的取样头直径  $d$ 。

F.2.3 预热取样管，宜使管内温度高于烟气露点温度。

F.2.4 开启真空泵预采烟气，求取流量计前温度  $t_q$  和压力  $P_q$ 。

F.2.5 进行近似等速取样，近似等速试取样时的流量  $V'_{rs}$  按式 (F.1) 计算：

$$V'_{rs} = 2.527 \times 10^{-3} d^2 w_y \frac{P_d + P_j}{273 + t_y} \sqrt{\frac{273 + t_q}{P_d + P_q}} \dots\dots\dots (F.1)$$

式中:

- $V'_{rs}$  ——近似等速试取样流量，单位为升每分钟 (L/min)；
- $d$  ——取样头的直径，单位为毫米 (mm)；
- $w_y$  ——烟道内烟气的流速，单位为米每秒 (m/s)；
- $P_d$  ——当地大气压，单位为帕 (Pa)；
- $P_j$  ——烟道静压，单位为帕 (Pa)；
- $t_y$  ——烟道内烟气温度，单位为摄氏度 (°C)；
- $t_q$  ——流量计前烟气温度，单位为摄氏度 (°C)；
- $P_q$  ——流量计前烟气压力，单位为帕 (Pa)。

F.2.6 按  $V'_{rs}$  大小试取样 20min，求得冷凝水量  $G_{rs}$  (g)，每分钟冷凝水量  $m$  按式 (F.2) 计算：

$$m = G_{rs} / t_m \dots\dots\dots (F.2)$$

式中：

$m$  ——每分钟冷凝水量，单位为克每分钟（g/min）；

$G_{rs}$  ——试取样时冷凝水量，单位为克（g）；

$t_m$  ——试取样时间，单位为分钟（min）。

F.2.7 进行等速取样，等速取样时的流量按式（F.3）计算：

$$V'_r = 2.527 \times 10^{-3} d^2 w_y \frac{P_d + P_j}{273 + t_y} \sqrt{\frac{273 + t_q}{P_d + P_q}} - 0.186 m \sqrt{\frac{273 + t_q}{P_d + P_q}} \dots \dots \dots (F.3)$$

式中：

$V'_r$  ——等速取样流量，单位为升每分钟（L/min）；

$d$  ——取样头的直径，单位为毫米（mm）；

$w_y$  ——烟道内烟气的流速，单位为米每秒（m/s）；

$P_d$  ——当地大气压，单位为帕（Pa）；

$P_j$  ——烟道静压，单位为帕（Pa）；

$t_y$  ——烟道内烟气温度，单位为摄氏度（℃）；

$t_q$  ——流量计前烟气温度，单位为摄氏度（℃）；

$P_q$  ——流量计前烟气压力，单位为帕（Pa）；

$m$  ——每分钟冷凝水量，单位为克每分钟（g/min）。

## 附录 G

(资料性)

## 设计数据和试验数据综合计算表

余热锅炉设计数据综合表（见表 G.1）。

表 G.1 余热锅炉设计数据综合表

序号	名称	符号	单位	设计数据
1	额定出力	D	kg/h 或 MW	
2	饱和(或过热)蒸汽压力	p	MPa	
3	过热蒸汽温度	$t_{gr}$	°C	
4	给水温度	$t_{gs}$	°C	
5	热水炉循环水量	G	kg/h	
6	热水炉进水压力	$p_{js}$	MPa	
7	热水炉进水温度	$t_{js}$	°C	
8	热水炉出水压力	$p_{cs}$	MPa	
9	热水炉出水温度	$t_{cs}$	°C	
10	余热锅炉出口烟气温度	$t_{yc}$	°C	
11	余热锅炉受热面积	$F_g$	m <sup>2</sup>	
12	辐射受热面积	$F_f$	m <sup>2</sup>	
13	过热器受热面积	$F_{gq}$	m <sup>2</sup>	
14	省煤器受热面积	$F_{sm}$	m <sup>2</sup>	
15	空气预热器受热面积	$F_{kq}$	m <sup>2</sup>	
16	气体量	V	m <sup>3</sup> /h	
17	余热资源温度	$t_t$	°C	
18	气体压力	$p_r$	Pa	
19	气体成分	-	-	-
	二氧化碳	CO <sub>2</sub>	%	
	二氧化硫	SO <sub>2</sub>	%	
	一氧化碳	CO	%	
	氢	H <sub>2</sub>	%	
	甲烷	CH <sub>4</sub>	%	
	氮	N <sub>2</sub>	%	
	氧	O <sub>2</sub>	%	
	水蒸气	H <sub>2</sub> O	%	
	...	-	-	-

表 G.1 余热锅炉设计数据综合表（续）

序号	名称	符号	单位	设计数据
20	含尘量	$\mu h$	$g/m^3$	
21	干燥基低位发热量	$Q_{net,d}$	$kJ/m^3$	
22	余热资源液体（固体）收到基元素成分	-	-	-
	碳	C	%	
	氢	H	%	
	氧	O	%	
	硫	S	%	
	氮	N	%	
	灰	A	%	
	水分	M	%	
23	收到基低位发热量	$Q_{net,ar}$	$kJ/kg$	
24	液体（固体）余热资源重量	B	$kg/h$	

试验数据综合计算表（见表 G.2）。

表 G.2 试验数据综合计算表

序号	测量或计算项目	符号	单位	数据来源	试验数据	
					1	2
1	余热锅炉给水量	$G_{gs}$	$kg/h$	试验数据		
2	炉水取样量	$G_q$	$kg/h$	试验数据		
3	给水压力	$P_{gs}$	MPa	试验数据		
4	给水温度	$t_{gs}$	$^{\circ}C$	试验数据		
5	余热锅炉蒸发量	D	$kg/h$	试验数据		
6	热水炉进水温度	$t_{js}$	$^{\circ}C$	试验数据		
7	热水炉进水压力	$P_{js}$	MPa	试验数据		
8	热水炉进水比容	$v$	$m^3/kg$	查水性质表		
9	热水炉热水流量	G	$kg/h$	试验数据		
10	余热锅炉出口蒸汽压力	p	MPa	试验数据		
11	过热蒸汽温度	$t_{gq}$	$^{\circ}C$	试验数据		
12	饱和蒸汽热焓	$h_{bq}$	$kJ/kg$	查干饱和蒸汽性质表		
13	过热蒸汽热焓	$h_{gq}$	$kJ/kg$	查过热蒸汽性质表		
14	蒸汽湿度	$\omega$	%	试验数据		
15	过热蒸汽含盐量	$S_{gq}$	$mg/kg$	试验数据		

表 G.2 试验数据综合计算表 (续)

序号	测量或计算项目	符号	单 位	数据来源	试验数据	
					1	2
16	汽化潜热	$\gamma$	kJ/kg	查干饱和蒸汽性质表		
17	给水热焓	$h_{gs}$	kJ/kg	查水性质表		
18	热水炉进水热焓	$h_{js}$	kJ/kg	查水性质表		
19	热水炉出水压力	$P_{cs}$	MPa	试验数据		
20	热水炉出水温度	$t_{cs}$	°C	试验数据		
21	热水炉出水热焓	$h_{cs}$	kJ/kg	查水性质表		
22	有效输出热量	$Q_1$	kJ/h	$(D+G_q-D_{gj})(h_{gq}-h_{gs})$ $+D_{gj}(h_{gq}-h_{gj})$ $+D'_{zq}(h''_{zq}-h'_{zq})$ $+D_{zj}(h''_{zq}-h_{zj})$		
	带蒸汽过热器的余热锅炉	$Q_1$	kJ/h	$+D_{zy}(h_{zy}-h_{gs}-\frac{\gamma\omega}{100})$ $+G_s(h_{bq}-\gamma-h_{gs})$		
	饱和蒸汽余热锅炉	$Q_1$	kJ/h	$D_{gs}(h_{bq}-h_{gs}-\gamma\omega/100)-G_s\gamma$ $G(h_{cs}-h_{js})$		
	热水余热锅炉	$Q_1$	kJ/h			
23	余热锅炉进口气体温度	$t_r$	°C	试验数据		
24	进口干气体中 CO <sub>1</sub> 含量	$(CO_2)_{dj}$	%	试验数据		
25	进口干气体中 O <sub>2</sub> 含量	$(O_2)_{dj}$	%	试验数据		
26	进口干气体中 CO 含量	$(CO_2)_{dj}$	%	试验数据		
27	进口干气体中 SO <sub>2</sub> 含量	$(SO_2)_{dj}$	%	试验数据		
28	进口干气体中 CH <sub>4</sub> 含量	$(CH_4)_{dj}$	%	试验数据		
29	进口干气体中 H <sub>2</sub> 含量 .....	$(H_2)_{dj}$	%	试验数据		
30	进口干气体中 N <sub>2</sub> 含量	$(N_2)_{dj}$	%	$100-[(CO_2)_{dj}+(O_2)_{dj}+\dots+(H_2)_{dj}]$		
31	进口气体中 H <sub>2</sub> O 含量	$H_2O_j$	%	试验数据		
32	进口气体中 CO <sub>2</sub> 含量	$CO_{zj}$	%	$(CO_2)_{dj}\frac{100-H_2O_j}{100}$		
33	进口气体中 O <sub>2</sub> 含量	$O_{zj}$	%	$(O_2)_{dj}\frac{100-H_2O_j}{100}$		
34	进口气体中 CO 含量	$CO_j$	%	$(CO)_{dj}\frac{100-H_2O_j}{100}$		
35	进口气体中 SO <sub>2</sub> 含量	$SO_{zj}$	%	$(SO_2)_{dj}\frac{100-H_2O_j}{100}$		

表 G.2 试验数据综合计算表 (续)

序号	测量或计算项目	符号	单 位	数据来源	试验数据	
					1	2
36	进口气体中 CH <sub>4</sub> 含量	$CH_{4j}$	%	$(CH_4)_{dj} \frac{100 - H_2O_j}{100}$		
37	进口气体中 H <sub>2</sub> 含量 .....	$H_{2j}$	%	$(H_2)_{dj} \frac{100 - H_2O_j}{100}$		
38	进口气体中 N <sub>2</sub> 含量	$N_{2j}$	%	$(N_2)_{dj} \frac{100 - H_2O_j}{100}$		
39	进口气体含尘量	$\mu_{hj}$	g/m <sup>3</sup>	试验数据		
40	进口气体中 CO <sub>2</sub> 比热	$C_{CO_2j}$	kJ/(m <sup>3</sup> ·°C)	查 表		
41	进口气体中 O <sub>2</sub> 比热	$C_{O_2j}$	kJ/(m <sup>3</sup> ·°C)	查 表		
42	进口气体中 CO 比热	$C_{COj}$	kJ/(m <sup>3</sup> ·°C)	查 表		
43	进口气体中 SO <sub>2</sub> 比热	$C_{SO_2j}$	kJ/(m <sup>3</sup> ·°C)	查 表		
44	进口气体中 CH <sub>4</sub> 比热	$C_{CH_4j}$	kJ/(m <sup>3</sup> ·°C)	查 表		
45	进口气体中 H <sub>2</sub> 比热	$C_{H_2j}$	kJ/(m <sup>3</sup> ·°C)	查 表		
46	进口气体中 N <sub>2</sub> 比热	$C_{N_2j}$	kJ/(m <sup>3</sup> ·°C)	查 表		
47	进口气体中尘的比热	$C_{\mu hj}$	kJ/(m <sup>3</sup> ·°C)	查 表		
48	进口气体中 H <sub>2</sub> O 的比热	$C_{H_2O}$	kJ/(m <sup>3</sup> ·°C)	查 表		
49	进口气体 (余热资源) 比热	$C_r$	kJ/(m <sup>3</sup> ·°C)	$\frac{1}{100} (C_{CO_2j} \times CO_{2j} + \dots + \frac{\mu_{hj}}{1000} C_{\mu hj})$		
50	液体 (固体) (余热资源) 比热	$C_r$	kJ/(m <sup>3</sup> ·°C)	查表或试验数据		
51	进口气体平均动压	$\Delta P_j$	Pa	试验数据		
52	当地大气压 .....	$P^d$	Pa	试验数据		
53	进口气体静压	$P_{jj}$	Pa	试验数据		
54	动压测量管校准系数	K	-	标定数据		

表 G.2 试验数据综合计算表 (续)

序号	测量或计算项目	符号	单位	数据来源	试验数据	
					1	2
55	标准状态下进口气体密度	$\rho^{0j}$	kg/m <sup>3</sup>	$1.9771\frac{CO_{2j}}{100} + 1.4291\frac{O_{2j}}{100} + 1.2504\frac{N_{2j}}{100} + 1.2506\frac{CO_j}{100} + 2.9263\frac{SO_{2j}}{100} + \dots + \frac{\mu_{hj}}{1000}$		
56	工作状态下进口气体密度	$\rho^j$	kg/m <sup>3</sup>	$2.6943 \times 10^{-3} \rho_0 \frac{P_d + P_{ij}}{273 + t_r}$		
57	进口气体平均流速	$\omega^{yj}$	m/s	$1.4142K \sqrt{\frac{\Delta P_j}{\rho^j}}$		
58	进口烟道截面积	$F_j$	m <sup>2</sup>	试验数据		
59	进口气体流量	$V_j$	m <sup>3</sup> /h	$9.6995F_j\omega_{yj}$		
60	液体(固体)余热资源重量	$B$	kg/h	试验数据		
61	环境温度	$t_k$	°C	试验数据		
62	余热资源显热	$Q_{zx}$	kJ/h	$V_j C_r (t_r - t_k)$ 或 $BC_r (t_r - t_k)$		
63	余热资源的收到基低位发热量	$Q_{net.ar}$	kJ/m <sup>3</sup> 或 kJ/kg	$\frac{1}{100} (12636CO + 10798H_2 + Q_{qt})$ 或试验数据		
64	输入热量	$Q_r$	kJ/h	$V_j [C_r (t_r - t_k) + Q_{net.ar}]$ 或 $B [C_r (t_r - t_k) + Q_{net.ar}]$		
65	余热锅炉出口烟气温度	$t_{yc}$	°C	试验数据		
66	出口干烟气中 CO <sub>2</sub> 含量	$(CO_2)_{dc}$	%	试验数据		
67	出口干烟气中 O <sub>2</sub> 含量	$(O_2)_{dc}$	%	试验数据		
68	出口干烟气中 CO 含量	$(CO)_{dc}$	%	试验数据		
69	出口干烟气中 SO <sub>2</sub> 含量 .....	$(SO_2)_{dc}$	%	试验数据		
70	出口干烟气中 N <sub>2</sub> 含量	$(N_2)_{dc}$	%	$100 - [(CO_2)_{dc} + (O_2)_{dc} + \dots]$		
71	出口烟气中 H <sub>2</sub> O 含量	$H_2O_c$	%	试验数据		
72	出口烟气中含尘量	$\mu_{hc}$	g/m <sup>3</sup>	试验数据		

表 G.2 试验数据综合计算表 (续)

序号	测量或计算项目	符号	单 位	数据来源	试验数据	
					1	2
73	出口烟气中 CO <sub>2</sub> 含量	CO <sub>2c</sub>	%	$(CO_2)_{dc} \frac{100-H_2O_c}{100}$		
74	出口烟气中 O <sub>2</sub> 含量	O <sub>2c</sub>	%	$(O_2)_{dc} \frac{100-H_2O_c}{100}$		
75	出口烟气中 CO 含量	CO <sub>c</sub>	%	$(CO)_{dc} \frac{100-H_2O_c}{100}$		
76	出口烟气中 SO <sub>2</sub> 含量 .....	SO <sub>2c</sub>	%	$(SO_2)_{dc} \frac{100-H_2O_c}{100}$		
77	出口烟气中 N <sub>2</sub> 含量	N <sub>2c</sub>	%	$(N_2)_{dc} \frac{100-H_2O_c}{100}$		
78	出口烟气中 H <sub>2</sub> O 比热	C <sub>H<sub>2</sub>O<sub>c</sub></sub>	kJ/(m <sup>3</sup> ·°C)	查 表		
79	出口烟气中 CO <sub>2</sub> 比热	C <sub>CO<sub>2c</sub></sub>	kJ/(m <sup>3</sup> ·°C)	查 表		
80	出口烟气中 O <sub>2</sub> 比热	C <sub>O<sub>2c</sub></sub>	kJ/(m <sup>3</sup> ·°C)	查 表		
81	出口烟气中 CO 比热	C <sub>CO<sub>c</sub></sub>	kJ/(m <sup>3</sup> ·°C)	查 表		
82	出口烟气中 SO <sub>2</sub> 比热	C <sub>SO<sub>2c</sub></sub>	kJ/(m <sup>3</sup> ·°C)	查 表		
83	出口烟气中 N <sub>2</sub> 比热	C <sub>N<sub>2c</sub></sub>	kJ/(m <sup>3</sup> ·°C)	查 表		
84	出口烟气中尘的比热	C <sub>μhc</sub>	kJ/(m <sup>3</sup> ·°C)	查 表		
85	出口烟气比热	C <sub>yc</sub>	kJ/(m <sup>3</sup> ·°C)	$\frac{1}{100}(C_{CO_{2c}} \times CO_{2c} + \dots + \frac{\mu_{hc}}{1000} C_{\mu hc})$		
86	出口烟气平均动压	ΔP <sub>c</sub>	Pa	试验数据		
87	出口烟道静压	P <sub>jc</sub>	Pa	试验数据		
88	标准状态下出口烟气密度	ρ <sub>oc</sub>	kg/m <sup>3</sup>	$1.9771 \frac{CO_{2c}}{100} + 1.4291 \frac{O_{2c}}{100} + \dots + \frac{\mu_{hc}}{1000}$		
89	工作状态下出口烟气密度	ρ <sub>c</sub>	kg/m <sup>3</sup>	$2.6943 \times 10^{-3} \rho_{oj} \frac{P_d + P_{jc}}{273 + t_{yc}}$		
90	出口烟气平均流速	ω <sub>yc</sub>	m/s	$1.4142K \sqrt{\frac{\Delta P_c}{\rho_c}}$		

表 G.2 试验数据综合计算表 (续)

序号	测量或计算项目	符号	单位	数据来源	试验数据	
					1	2
91	出口烟道截面积	$F_c$	$m^2$	试验数据		
92	出口烟气流量	$V_{yc}$	$m^3/h$	$9.6995F_c\omega_{yc}$		
93	出口烟气显热	$Q_{rxc}$	$kJ/h$	$V_{yc}C_{yc}(t_{yc}-t_k)$		
94	余热锅炉出口烟气水蒸气体积含量	$V_{H_2O_c}$	$m^3/h$	$\frac{H_2O_c}{100}V_{yc}$		
95	余热锅炉区间漏风量	$V_{ql}$	$m^3/h$	$\frac{(V_{yc}-V_{H_2O_c})[(O_2)_{dc}-(O_2)_{dj}]}{20.657-0.984(O_2)_{dj}}$		
96	余热锅炉进口气体量	$V_{yj}$	$m^3/h$	$V_{yc}-V_{ql}$		
97	出口干烟气量	$V_{gvc}$	$m^3/h$	$V_{yc}-V_{H_2O_c}$		
98	余热锅炉排烟热损失	$q_2$	%	$\frac{Q_{rxc}}{Q_r}\times 100$		
99	余热锅炉可燃气体不完全燃烧热损失	$q_3$	%	$\left\{\frac{[126.36(CO)_d+107.98(H_2)_d+(Q_{qt})_{yc}V_{yc}^g]}{Q_r}\right\}\times 100$		
100	余热锅炉可燃固体不完全燃烧热损失	$q_4$	%	$\frac{3.3727\times 10^{-2}\mu_g V_{yc}}{Q_r}\times 100$		
101	余热锅炉炉体散热损失	$q_5$	%	查表或实测计算		
102	排出的液态(固态)物质的比热	$C_s$	$kJ/(kg\cdot^{\circ}C)$	查表		
103	排出的液态(固态)物质的重量	$\mu_l$	$kg/h$	试验数据		
104	排出的液态(固态)物质的温度	$t_l$	$^{\circ}C$	试验数据		
105	其他损失热量	$q_6$	%	$\frac{C_s\mu_s(t_l-t_k)}{Q_r}\times 100$		
106	余热利用率	$\varepsilon$	%	$\frac{Q_1}{Q_r}\times 100$		
107	平均余热利用率	$\varepsilon_p$	%	$(\varepsilon_1+\varepsilon_2)/2$		