

中华人民共和国能源行业标准

NB/T 47066—2018

冷凝锅炉热工性能试验方法

Thermal performance test method for condensing boiler

2018-06-06 发布

2018-10-01 实施

国家能源局 发布

国家能源局

公告

2018 年 第 8 号

依据《国家能源局关于印发〈能源领域行业标准化管理办法（试行）〉及实施细则的通知》（国能局科技〔2009〕52号）有关规定，经审查，国家能源局批准《煤层气定向井井身质量控制要求》等 87 项行业标准，其中能源标准（NB）47 项、电力标准（DL）40 项，现予以发布。

附件：行业标准目录

二〇一八年六月六日

附件：

行业标准目录

序号	标准编号	标准名称	代替标准	采标号	批准日期	实施日期
1~46	(略)					
47	NB/T 47066—2018	凝汽器热工性能试验方法			2018-06-06	2018-10-01
48~87	(略)					

目 次

前言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和符号	1
4 试验要求	11
5 仪表仪器及测试方法	16
6 结果计算	22
7 修正	31
8 不确定度分析	31
9 试验报告	41
附录 A（规范性附录） 网格法等面积的划分原则及代表点的确定	43
附录 B（规范性附录） 伴热原理测量冷凝烟气温度和湿度	45
附录 C（规范性附录） 饱和蒸汽湿度和过热蒸汽含盐量测定方法	47
附录 D（资料性附录） 常用天然气成分中的气体特性	51
附录 E（资料性附录） 常用气体特性	52
附录 F（资料性附录） 计算示例	57
参考文献	74

前 言

本标准按 GB/T 1.1—2009《标准化工作导则 第1部分：标准的结构和编写》给出的规则起草。

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

本标准起草单位：中国特种设备检测研究院、哈尔滨工业大学、沈阳特种设备检测研究院、山东省特种设备检验研究院、江苏省特种设备安全监督检验研究院、宁波市特种设备检验研究院、上海发电设备成套设计研究院有限责任公司、上海工业锅炉研究所有限公司、江苏双良锅炉有限公司、浙江特富锅炉有限公司、西安市金牛股份有限公司、哈尔滨红光锅炉集团有限公司、中节能科技投资有限公司。

本标准主要起草人：齐国利、管坚、高建民、吴少华、张显、宋吉民、李以善、孙涛、罗昭强、张瑞、陈秀彬、杨麟、吴艳、邓龙强、王惠云、孙玉凤、谢正武、常勇强、于吉明。

本标准为首次发布。

冷凝锅炉热工性能试验方法

1 范围

1.1 本标准规定了冷凝锅炉热工性能试验要求、仪表仪器及测试方法、结果计算、修正、不确定度分析以及试验报告的要求。

1.2 本标准适用于燃天然气的冷凝锅炉，其他燃气锅炉和有冷凝现象的锅炉可参照执行。

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 2624.2	用安装在圆形截面管道中的差压装置测量满管流体流量	第2部分：孔板
GB/T 2624.3	用安装在圆形截面管道中的差压装置测量满管流体流量	第3部分：喷嘴和文丘里喷嘴
GB/T 8174	设备及管道绝热效果的测试与评价	
GB/T 10184	电站锅炉性能试验规程	
GB/T 13610	天然气的组成分析	气相色谱法
JJF 1059.1	测量不确定度评定与表示	

3 术语和符号

3.1 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1.1

冷凝锅炉 **condensing boiler**

烟气中的水蒸气连续凝结释放汽化潜热的锅炉。

3.1.2

输入热量 **input energy**

从燃料中可获得的全部化学能。

3.1.3

输出热量 **output energy**

被工质吸收且未被在锅炉系统中回收的那部分热量。

3.1.4

基准温度 **reference temperature**

进出锅炉系统边界的物质流计算显热及其损失的热量起算点温度。

注：本标准基准温度取为 25℃。

3.1.5

输入-输出法 **input-output method**

通过直接测量输入和输出热量来确定锅炉热效率的方法，也称正平衡测量法。

3.1.6

能量平衡法 **energy balance method**

通过详细考察所有输入和输出锅炉系统的热量来确定锅炉热效率的方法，也称间接测量法、热损失法。

3.1.7

测量精密度 **measurement precision**

在规定条件下，对同一或类似对象重复测量所得示值或测得值间的一致程度，简称“精密度”。

3.1.8

实验标准偏差 **experimental standard deviation**

对同一被测量进行 n 次测量，表征测量结果分散性的量。

3.1.9

测量不确定度 **measurement uncertainty**

表征合理地赋予被测量值的分散性，与测量结果相联系的参数，简称“不确定度”。

3.1.10

标准不确定度 **standard uncertainty**

以标准偏差表示的测量不确定度。

3.1.11

测量不确定度的 A 类评定 **type A evaluation of measurement uncertainty**

对在规定测量条件下测得的量值用统计分析的方法进行的测量不确定度分量的评定，简称“A 类评定”。

3.1.12

测量不确定度的 B 类评定 **type B evaluation of measurement uncertainty**

用不同于测量不确定度的 A 类评定的方法对测量不确定度分量进行的评定，简称“B 类评定”。

3.1.13

合成标准不确定度 **combined standard uncertainty**

由在一个测量模型中各输入量的标准测量不确定度获得的输出量的标准测量不确定度。

3.1.14

相对标准不确定度 **relative standard uncertainty**

标准不确定度除以测得值的绝对值。

3.1.15

扩展不确定度 **expanded uncertainty**

合成标准不确定度与一个大于 1 的数字因子的乘积。

3.1.16

包含区间 **coverage interval**

基于可获得的信息确定的包含被测量一组值的区间，被测量值以一定的概率落在该区间内。

3.1.17

包含概率 coverage probability

在规定的包含区间内包含被测量的一组值的概率。

3.1.18

包含因子 coverage factor

为获得扩展不确定度，对合成标准不确定度所乘的大于1的数。

3.1.19

自由度 degrees of freedom

在方差的计算中，和的项数减去对和的限制数。

3.2 符号

下列符号适用于本文件。

本标准符号采用英文字母和希腊字母表示，下角标均采用英文缩写。

表1为本标准采用的符号一览表，表2为下角标说明。

表1 符号和单位

序号	符 号	说 明	单 位
1	A_{Src}	平面投影面积（对圆形取外表面积）	m^2
2	a	被测量可能值区间的半宽度	
3	a_i	系数	
4	C	系数，取3 600	
5	$C_1、C_2、C_3、C_4$	成分比热容方程常数	
6	C_a	极差系数	
7	$C_{\text{BW.H}_2\text{O.Cl}^-}$	锅水氯离子含量	mg/kg
8	$C_{\text{BW.H}_2\text{O.Na}^+}$	锅水钠离子含量	mg/kg
9	$C_{\text{Sat.H}_2\text{O.Cl}^-}$	饱和蒸汽凝结水氯离子含量	mg/kg
10	$C_{\text{Sat.H}_2\text{O.Na}^+}$	饱和蒸汽凝结水钠离子含量	mg/kg
11	c_p	瞬时比定压热容	$\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$
12	\bar{c}_p	平均比定压热容	$\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$
13	$c_{\text{p.a.d}}$	干空气的比定压热容	$\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$
14	$c_{\text{p.CO}}$	一氧化碳的比定压热容	$\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$
15	$c_{\text{p.CO}_2}$	二氧化碳的比定压热容	$\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$
16	$c_{\text{p.f}}$	燃料气的比定压热容	$\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$
17	$c_{\text{p.fg.d}}$	最后一级冷凝受热面出口干烟气的平均比定压热容	$\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$
18	$c_{\text{p.H}_2}$	氢气的比定压热容	$\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$
19	$c_{\text{p.H}_2\text{O}}$	水蒸气的比定压热容	$\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$

表 1 (续)

序号	符 号	说 明	单 位
20	c_{p,N_2}	氮气的比定压热容	$\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$
21	c_{p,O_2}	氧气的比定压热容	$\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$
22	$c_{p,\sum C_m H_n}$	碳氢化合物的比定压热容	$\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$
23	c_{x_i}	灵敏系数	
24	$D_{\text{ev.Sat.cr}}$	饱和蒸汽锅炉折算蒸发量	t/h
25	$D_{\text{ev.Sat.O.M}}$	实测饱和蒸汽锅炉输出蒸发量	t/h 或 kg/h
26	$D_{\text{ev.Sut.cr}}$	过热蒸汽锅炉折算蒸发量	t/h
27	$D_{\text{ev.Sut.O.M}}$	实测过热蒸汽锅炉输出蒸发量	t/h
28	D	蒸汽引出管内径	mm
29	$d_{\text{Sat.Sa}}$	蒸汽取样管孔内径	mm
30	EX	总驱动效率	%
31	E	随机效应和系统效应引起的测量不确定度	
32	$H_{a,H_2O,g,En}$	进入锅炉空气温度对应的水蒸气焓	kJ/m^3
33	$H_{a,H_2O,g,Re}$	基准温度对应的进入锅炉空气的水蒸气焓	kJ/m^3
34	$H_{a,H_2O,l,Re}$	基准温度对应的进入锅炉空气的水蒸气转变为水的焓	kJ/m^3
35	$H_{\text{Cond.En}}$	最后一级冷凝受热面进水焓	kJ/kg
36	$H_{\text{Cond.Lv}}$	最后一级冷凝受热面出水焓	kJ/kg
37	$H_{F,En}$	进入系统的燃料温度对应的燃料焓	kJ/m^3
38	$H_{F,Re}$	进入系统的燃料基准温度对应的燃料焓	kJ/m^3
39	H_{FW}	给水焓	kJ/kg
40	$H_{FW,D}$	设计给水焓	kJ/kg
41	$H_{FW,M}$	实测给水焓	kJ/kg
42	$H_{fg,Cond,H_2O,l,Lv}$	离开系统边界的烟气温度对应的冷凝水焓	kJ/kg
43	$H_{fg,Cond,H_2O,l,Re}$	基准温度对应的冷凝水焓	kJ/kg
44	$H_{HW,En}$	热水锅炉进水焓	kJ/kg
45	$H_{HW,Lv}$	热水锅炉出水焓	kJ/kg
46	H_{Sat}	饱和蒸汽焓	kJ/kg
47	$H_{\text{Sat,D}}$	设计饱和蒸汽焓	kJ/kg
48	$H_{\text{Sat,M}}$	实测饱和蒸汽焓	kJ/kg
49	H_{Sut}	过热蒸汽焓	kJ/kg
50	$H_{\text{Sut,D}}$	设计过热蒸汽焓	kJ/kg
51	$H_{\text{Sut,M}}$	实测过热蒸汽焓	kJ/kg

表 1 (续)

序号	符 号	说 明	单 位
52	$H_{\text{Sut.Rh.En}}$	再热蒸汽进口焓	kJ/kg
53	$H_{\text{Sut.Rh.Lv}}$	再热蒸汽出口焓	kJ/kg
54	$H_{\text{SW.Bd}}$	锅筒压力对应的饱和水焓 (计算排污热量)	kJ/kg
55	H_{WJ}	喷水焓	kJ/kg
56	$H_{\text{WJ.Rh.Lv}}$	再热蒸汽的喷水出口焓	kJ/kg
57	$H_{\text{WJ.Rh.En}}$	再热蒸汽的喷水进口焓	kJ/kg
58	$h_{\text{ab.a}}$	空气的绝对湿度, 指每千克干空气中水蒸气的质量	kg/kg
59	$h_{\text{ab.F}}$	气体燃料的绝对湿度, 指每千克干气体燃料中水蒸气的质量	kg/kg
60	$h_{\text{ab.fg}}$	最后一级冷凝受热面冷凝后烟气的含湿量	kg/kg
61	$h_{\text{ab.fg.Cond.Lv}}$	最后一级冷凝受热面出口的烟气含湿量	kg/kg
62	$h_{\text{RH.a}}$	按干、湿球温度查得的空气相对湿度	%
63	$h_{\text{RH.fg.i}}$	对应测量点 i 的相对湿度, 用伴热式湿度测量系统进行测量获得	%
64	k	包含因子, 置信因子	
65	M	燃料气的平均相对分子质量	
66	$Mr_{\text{BW.Sa}}$	锅水取样量	kg/h
67	$Mr_{\text{Cond.FW.Fl}}$	最后一级冷凝受热面给水流量	kg/h
68	$Mr_{\text{CW.Fl}}$	热水锅炉循环水量	kg/h
69	$Mr_{\text{FW.Fl}}$	锅炉给水量	kg/h
70	$Mr_{\text{Sat.Sa}}$	蒸汽试样流量	kg/h
71	$Mr_{\text{Sut.Fl}}$	过热蒸汽流量	kg/h
72	$Mr_{\text{Sut.Rh}}$	再热蒸汽质量流量	kg/h
73	$Mr_{\text{Sut.Sa}}$	过热蒸汽取样量	kg/h
74	$Mr_{\text{W.Bd}}$	排污水质量流量	kg/h
75	Mr_{WJ}	喷水流量	kg/h
76	$Mr_{\text{WJ.Rh}}$	再热蒸汽的喷水质量流量	kg/h
77	n	取样孔数, 用来计算 R 的参数总数	个
78	p	概率	
79	p_{at}	当地大气压力	Pa
80	p_{FW}	给水压力	MPa
81	$p_{\text{st.Sat.}t_{\text{a}}}$	在 t_{a} 温度下的水蒸气饱和压力	Pa
82	$p_{\text{st.Sat.}t_i}$	在 t_i 温度下的水蒸气饱和压力	hPa

表 1（续）

序号	符 号	说 明	单 位
83	$Q_{gr,ar}$	燃料的高位发热量	$\text{kJ/m}^3, \text{MJ/m}^3$
84	Q_i	组分 i 的理想气体体积发热量（高位或低位）	MJ/m^3
85	$Q_{net,ar}$	燃料的低位发热量	$\text{kJ/m}^3, \text{MJ/m}^3$
86	Q_{Rh}	再热蒸汽输出热量	kJ/h
87	Q_{rB}	外来热量	kJ/h
88	Q_{rBd}	排污水携带热量	kJ/h
89	Q_{rF}	燃料的输入热量	kJ/h
90	$Q_{rHW,Cond}$	热水锅炉最后一级受热面输出热量	kJ/kg
91	Q_{η}	输入热量	kJ/h
92	Q_{η_L}	损失热量	kJ/h
93	Q_{rO}	输出热量	kJ/h
94	$Q_{rO,HW}$	热水锅炉输出热量	kJ/h
95	$Q_{rO,Sat}$	饱和蒸汽锅炉输出热量	kJ/h
96	$Q_{rO,Sut}$	过热蒸汽锅炉输出热量	kJ/h
97	$Q_{rSat,Cond}$	饱和蒸汽锅炉最后一级冷凝受热面输出热量	kJ/h
98	$Q_{rSut,Cond}$	过热蒸汽锅炉最后一级冷凝受热面输出热量	kJ/kg
99	Q_X	输入的驱动能量	kW
100	$q_{p,B,a,d,gr}$	基于高位发热量的进入系统的干空气所携带的外来热量	$\%$
101	$q_{p,B,a,d,net}$	基于低位发热量的进入系统的干空气所携带的外来热量	$\%$
102	$q_{p,B,F,gr}$	基于高位发热量的燃料显热带来的外来热量	$\%$
103	$q_{p,B,F,net}$	基于低位发热量的燃料显热带来的外来热量	$\%$
104	$q_{p,B,H_2O,gr}$	基于高位发热量的空气中水分带来的外来热量	$\%$
105	$q_{p,B,H_2O,net}$	基于低位发热量的空气中水分带来的外来热量	$\%$
106	$q_{p,B,X,gr}$	基于高位发热量的辅机设备功率的外来热量	$\%$
107	$q_{p,B,X,net}$	基于低位发热量的辅机设备功率的外来热量	$\%$
108	$q_{p,L,fg,CO,HC,gr}$	基于高位发热量的烟气中一氧化碳、未燃碳氢物质造成的损失	$\%$
109	$q_{p,L,fg,CO,HC,net}$	基于低位发热量的烟气中一氧化碳、未燃碳氢物质造成的损失	$\%$
110	$q_{p,L,fg,Cond,gr}$	基于高位发热量的烟气携带水蒸气损失	$\%$
111	$q_{p,L,fg,Cond,gr,l}$	基于高位发热量的发生冷凝的水蒸气汽化潜热被吸收造成的损失	$\%$
112	$q_{p,L,fg,Cond,net}$	基于低位发热量的烟气携带水蒸气损失	$\%$
113	$q_{p,L,fg,Cond,net,l}$	基于低位发热量的发生冷凝的水蒸气汽化潜热被吸收造成的损失	$\%$

表 1 (续)

序号	符 号	说 明	单 位
114	$q_{p,L,fg,d,gr}$	基于高位发热量的干烟气损失	%
115	$q_{p,L,fg,d,net}$	基于低位发热量的干烟气损失	%
116	q_{pB}	基于燃料输入的外来热量	%
117	q_{pL}	基于燃料输入的热损失	%
118	$q_{r,L,src,gr}$	基于高位发热量由表面辐射和对流引起的损失	%
119	$q_{r,L,src,net}$	基于低位发热量由表面辐射和对流引起的损失	%
120	R	结果, 例如效率	%
121	R_a	极差	
122	$s(\bar{x})$	算术平均值的实验标准偏差	
123	$s(x_k)$	实验标准偏差	
124	T_k	工质温度	K
125	t_a	被测空气温度	℃
126	$t_{a,d}$	进入系统的干空气温度	℃
127	t_{FW}	给水温度	℃
128	$t_{fg,Cond,Lv}$	离开系统边界的烟气温度	℃
129	$t_{fg,Cond,Re}$	离开系统边界的烟气基准温度	℃
130	t_i	某测量点的温度	℃
131	t_{re}	基准温度	℃
132	U	扩展不确定度	
133	$u_A(\bar{R})$	被测量估计值 \bar{R} 的 A 类标准不确定度	
134	$u_A(\bar{x})$	被测量估计值 \bar{x} 的 A 类标准不确定度	
135	$u_B(\bar{R})$	被测量估计值 \bar{R} 的 B 类标准不确定度	
136	u_{B_n}	单股物流分叉形成的每一管道数值积分产生的 B 类标准不确定度	
137	$u_{\bar{B}_x}$	参数平均值的 B 类标准不确定度	
138	$u_{B_{xi}}$	仪表回路 i 的 B 类标准不确定度	
139	V_a	对应每立方米燃料实际送入炉内的空气量	m ³ /m ³
140	$V_{a,d,g}$	对应每立方米燃料的实际干空气量	m ³ /m ³
141	$V_{a,d,th,g}$	燃用天然气的理论干空气量	m ³ /m ³
142	$V_{a,H_2O,g}$	空气携带的水蒸气量	m ³ /m ³
143	$V_{a,th}$	入炉燃料完全燃烧所需的空气量	m ³ /m ³
144	$V_{a,w,g}$	对应每立方米燃料的湿空气量	m ³ /m ³

表 1 (续)

序号	符 号	说 明	单 位
145	$V_{F,Ash,g}$	每立方米干气体燃料所携带的灰分	m^3/m^3
146	$V_{F,H_2,H_2O,g}$	每立方米干气体燃料中氢燃烧产生的水蒸气量	m^3/m^3
147	$V_{F,H_2O,g}$	每立方米干气体燃料所携带的水蒸气量	m^3/m^3
148	$V_{fg,Cond,H_2O,g}$	对应每立方米燃料的最后一级冷凝受热面出口烟气中水蒸气含量	m^3/m^3
149	$V_{fg,Cond,H_2O,l}$	每立方米燃料燃烧生成的烟气经最后一级冷凝受热面后冷凝下来的水蒸气量	m^3/m^3
150	$V_{fg,d,Cond,Lv}$	最后一级冷凝受热面出口每标准立方米燃料燃烧生成的干烟气体积	m^3/m^3
151	$V_{fg,d,g}$	每立方米燃料燃烧生成的干烟气体积	m^3/m^3
152	$V_{fg,H_2O,g}$	烟气中的总水分	m^3/m^3
153	$V_{r,F,l}$	燃料的体积流量	m^3/h
154	$V_{r,F,l,M}$	实际测量的燃料累积流量	m^3/h
155	x	测量量	
156	\bar{y}	变量 y 随时间或空间的连续变量模型积分值	
157	z	连续分布参数的时间平均值 (温度、氧量等)	
158	α	过量空气系数	
159	γ	水的汽化潜热	kJ/kg
160	γ_{Cond}	最后一级冷凝受热面中烟气平均压力下的水蒸气汽化潜热	kJ/kg
161	η	锅炉热效率	$\%$
162	ν	自由度	
163	$\rho_{F,g}$	干燃料气体密度	kg/m^3
164	$\sigma_{Sat,H_2O,TDS}$	饱和蒸汽凝结水电导率值	$\mu S/cm$
165	$\sigma_{BW,H_2O,TDS}$	锅水电导率值	$\mu S/cm$
166	$\varphi_{CH_4,g}$	天然气中甲烷的体积分数	$\%$
167	$\varphi_{CH_4,fg}$	烟气中甲烷的体积分数	$\%$
168	$\varphi_{C_2H_6,g}$	天然气中乙烷的体积分数	$\%$
169	$\varphi_{C_3H_8,g}$	天然气中丙烷的体积分数	$\%$
170	$\varphi_{C_4H_{10},g}$	天然气中丁烷的体积分数	$\%$
171	$\varphi_{C_5H_{12},g}$	天然气中戊烷的体积分数	$\%$
172	$\varphi_{\sum C_m H_n,fg}$	烟气中碳氢化合物的体积分数	$\%$
173	$\varphi_{\sum C_m H_n,g}$	天然气中碳氢化合物的体积分数	$\%$
174	$\varphi_{CO,fg}$	烟气中一氧化碳的体积分数	$\%$

表 1（续）

序号	符 号	说 明	单 位
175	$\varphi_{\text{CO.g}}$	天然气中一氧化碳的体积分数	%
176	$\varphi_{\text{CO}_2.\text{fg}}$	烟气中二氧化碳的体积分数	%
177	$\varphi_{\text{CO}_2.\text{g}}$	天然气中二氧化碳的体积分数	%
178	$\varphi_{\text{H}_2.\text{fg}}$	烟气中氢气的体积分数	%
179	$\varphi_{\text{H}_2.\text{g}}$	天然气中氢气的体积分数	%
180	$\varphi_{\text{H}_2\text{S.g}}$	天然气中硫化氢的体积分数	%
181	φ_i	气体燃料中相应各可燃气体成分的体积分数	%
182	$\varphi_{\text{N}_2.\text{fg}}$	烟气中氮气的体积分数	%
183	$\varphi_{\text{N}_2.\text{g}}$	天然气中氮气的体积分数	%
184	$\varphi_{\text{NO.fg}}$	烟气中一氧化氮的体积分数	%
185	$\varphi_{\text{NO}_x.\text{fg}}$	烟气中氮氧化物的体积分数	%
186	$\varphi_{\text{O}_2.\text{fg}}$	烟气中氧气的体积分数	%
187	$\varphi_{\text{O}_2.\text{g}}$	天然气中氧气的体积分数	%
188	$\varphi_{\text{RO}_2.\text{fg}}$	烟气中 RO ₂ 的体积分数	%
189	$\varphi_{\text{SO}_2.\text{fg}}$	烟气中二氧化硫的体积分数	%
190	$\varphi_{\text{SO}_x.\text{fg}}$	烟气中硫氧化物的体积分数	%
191	ω	饱和蒸汽湿度	%
192	ω_i	燃料气成分的质量分数	

表 2 下角标说明

角 标	说 明
A	随空间的
a	空气
ab	绝对的
ar	入炉燃料
at	大气、环境的，雾化
B	外来带入
Bd	排污
Bx	从属于参数 x 的 B 类标准不确定度
BW	锅水
CH ₄	甲烷

表 2 (续)

角 标	说 明
Cl ⁻	氯离子
C _m H _n	碳氢化合物
CO	一氧化碳
CO ₂	二氧化碳
Cond	最后一级冷凝受热面的冷凝
CW	循环水
cr	修正的, 折算的
D	设计的
d	干的, 干燥基
En	进口
e	百分数
ev	蒸发
F	燃料
Fg	烟气
Fl	流量
FW	给水, 加权平均值
g	气体
gr	高位发热量
H ₂	氢气
H ₂ O	水
H ₂ S	硫化氢
HC	碳氢化合物
HW	热水
h	湿的
I	输入
<i>i</i>	组分, 测量点
<i>k</i>	参数
L	损失
Lv	出口
l	液体
M	实测的, 独立被测量的数目
<i>m</i>	测量网格中的测点数, 碳氢化合物中的碳原子数
N ₂	氮气

表 2 (续)

角 标	说 明
NO _x	氮氧化物
Na ⁺	钠离子
<i>n</i>	碳氢化合物中的氢原子数, 管道数
net	低位发热量
O	输出
O ₂	氧气
p	定压的
pB	定压下外来热量
pL	定压下热损失
Re	基准的
RH	相对的
Rh	再热
r	额定
Sa	取样
Sat	饱和的
SO ₂	二氧化硫
SO _x	硫氧化物
Src	表面辐射与对流
Sut	过热, 过热器
st	蒸汽
TDS	电导率
th	理论的
UW	未加权平均值
W	水, 水分, 风
WJ	喷水
X	辅助机械
<i>x</i>	参数
τ	随时间的

4 试验要求

4.1 锅炉系统热平衡边界

本标准规定的锅炉系统热平衡边界见图 1~图 3, 其中图 1 为燃气冷凝锅炉热平衡图, 锅炉系统热平衡系统包括汽水系统、燃烧设备、省煤器/冷凝器、空气预热器、最后一级冷凝受热面和烟气再循环风机等。不包括送风机、引风机和热力除氧器等设备。图 2 为典型的有冷凝现象的燃气热水锅炉系统热平衡边界图; 图 3 为典型的有冷凝现象的燃气蒸汽锅炉系统热平衡边界图。

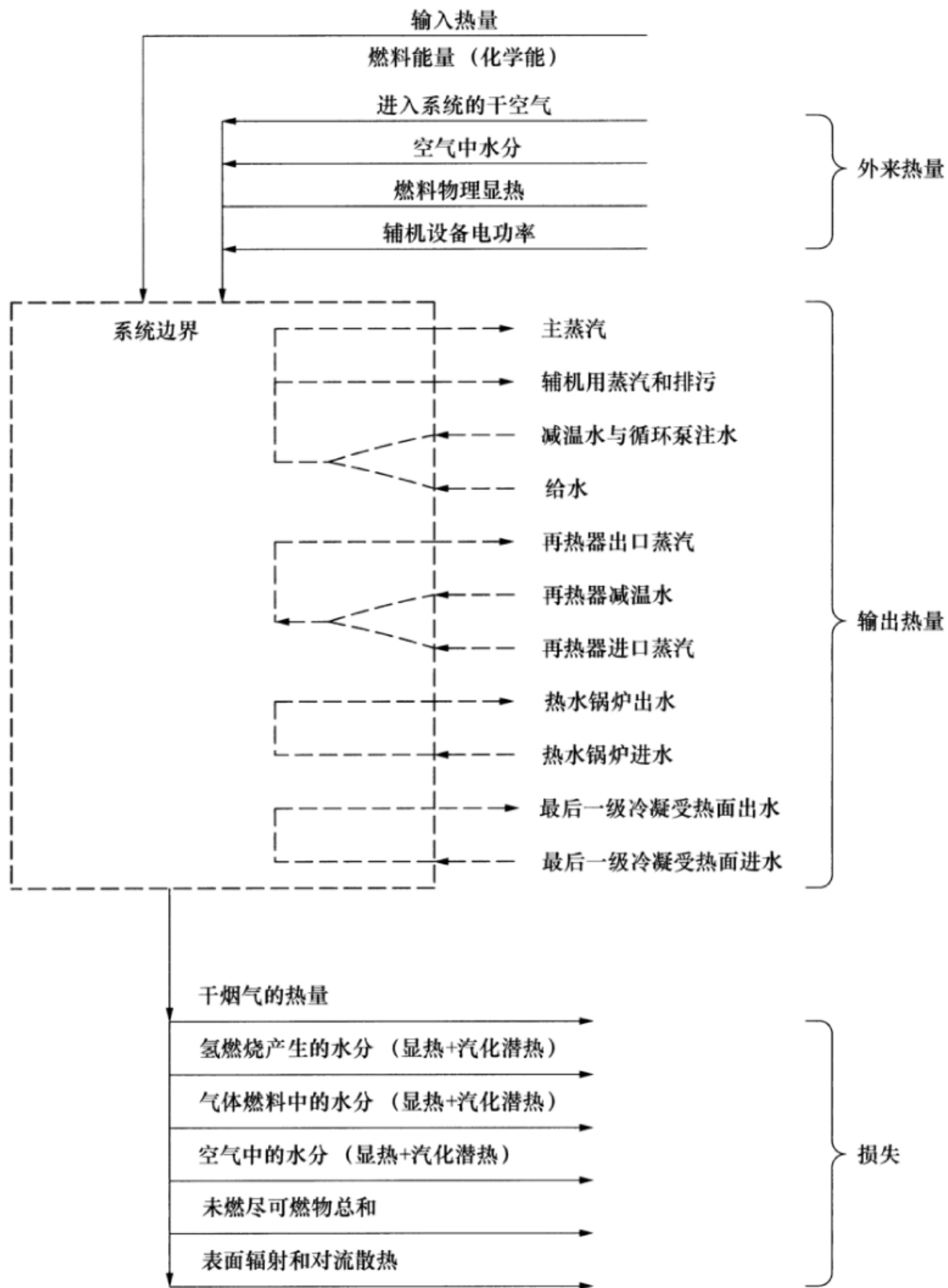


图 1 燃气冷凝锅炉热平衡图

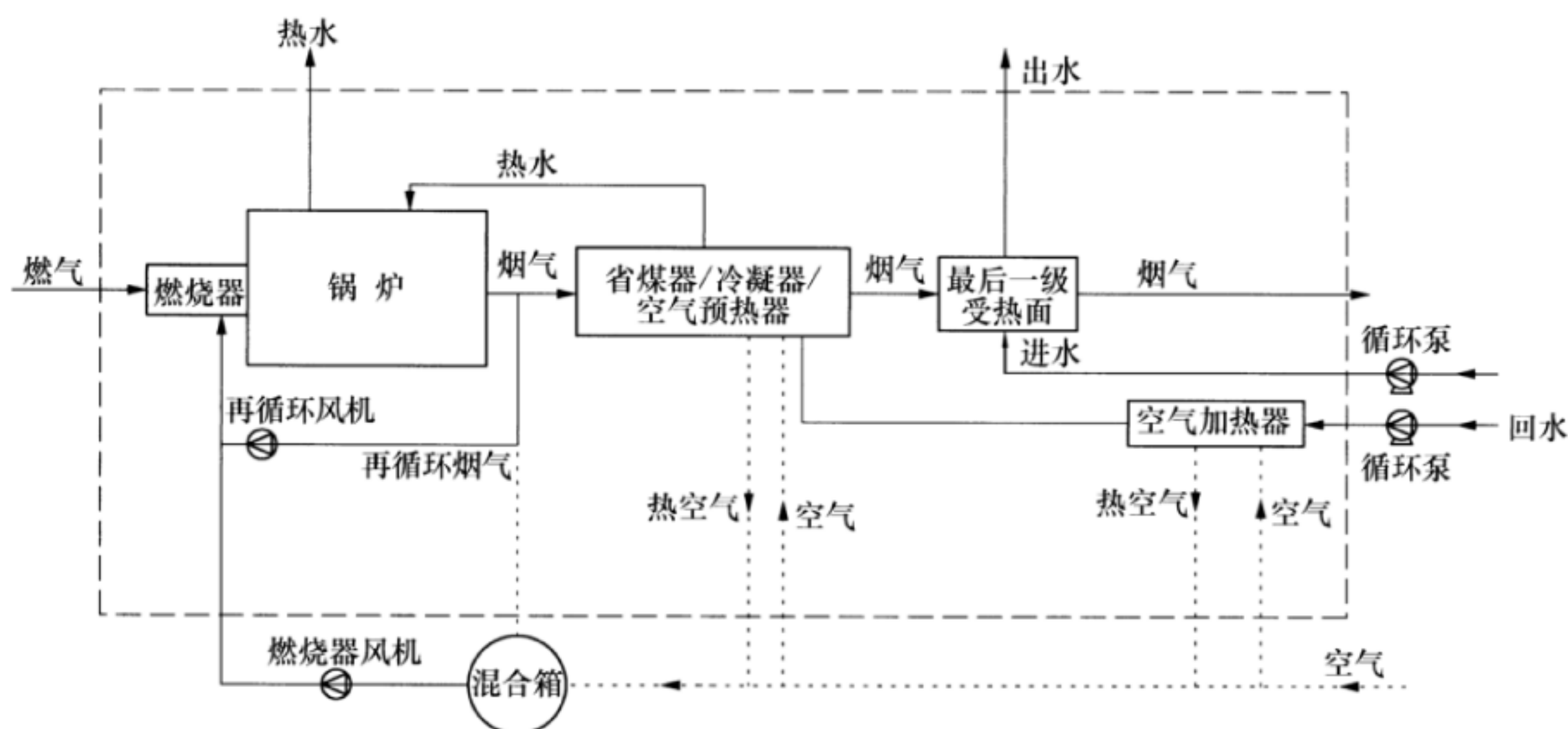


图2 典型的有冷凝现象的燃气热水锅炉系统热平衡边界图

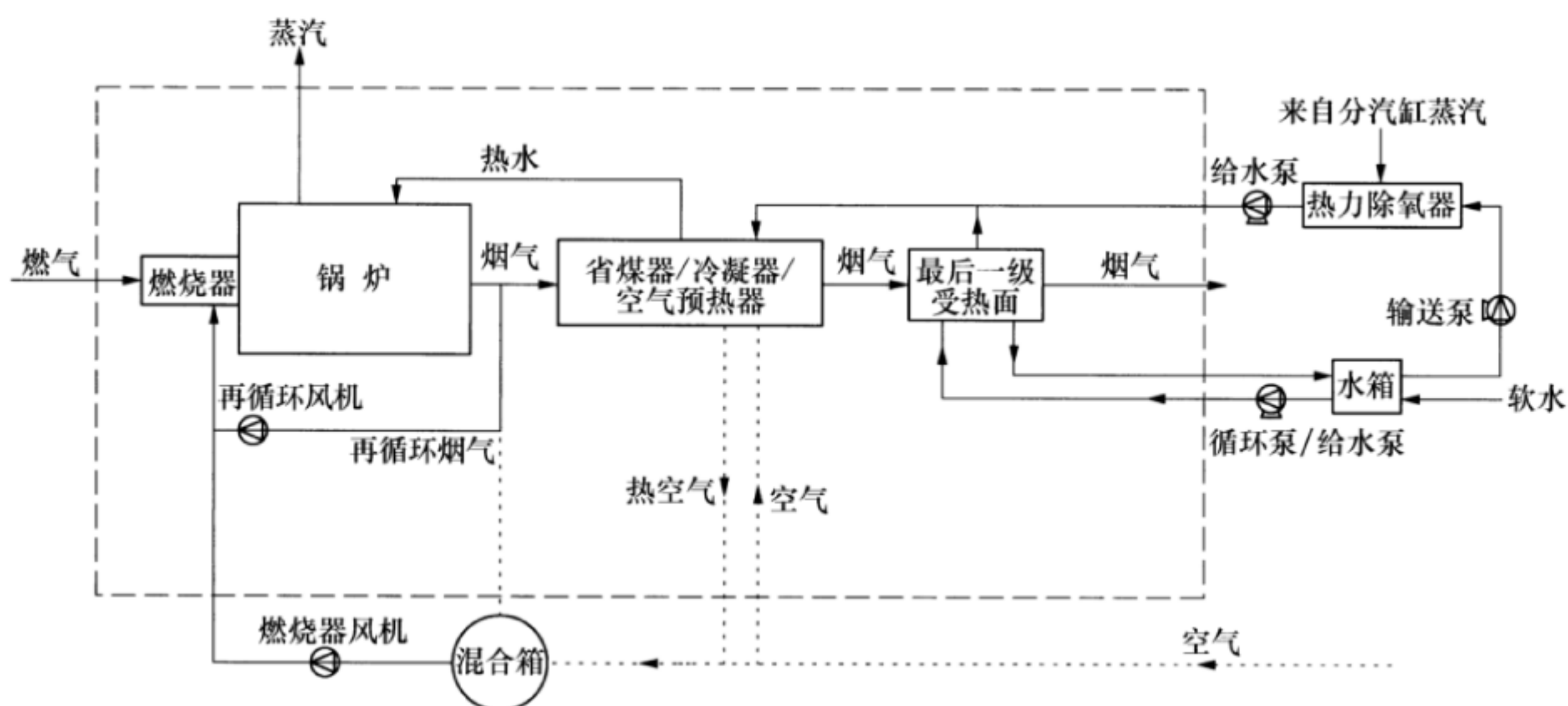


图3 典型的有冷凝现象的燃气蒸汽锅炉系统热平衡边界图

4.2 试验前应达成的协议

试验前应达成协议内容如下：

- 试验目的与试验内容。
- 试验单位及职责范围。
- 采用输入-输出法或热损失法对热效率的测试和计算方法。
- 试验测试项目、测点位置及数量。
- 天然气、烟气等取样方法及分析。
- 试验所用仪器及其检定、校准。
- 设备状态及试验期间的运行方式，包括辅助设备和控制系统的投运方式。
- 试验期间锅炉主要参数允许偏差。

- i) 稳定工况的确认方法，工况的稳定时间和试验持续时间。
- j) 特殊工况及异常情况的处理，试验数据的取舍。
- k) 试验原始记录和燃料处置。
- l) 重复性试验工况之间的允许偏差。
- m) 保证条件以及换算到保证条件下的热效率计算方法。
- n) 试验大纲的确认。试验大纲由试验负责单位编写，并经试验各方认可，内容至少包括：
 - 1) 试验目的；
 - 2) 试验条件及要求；
 - 3) 试验工况；
 - 4) 主要测点布置、仪表仪器及测试方法；
 - 5) 试验数据处理原则；
 - 6) 试验人员及组织；
 - 7) 试验日程及计划。
- o) 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。
- p) 其他在本标准内的未尽事宜。

4.3 试验准备和试验条件

- 4.3.1 确认锅炉系统各主、辅机能正常运转并满足试验要求。
- 4.3.2 对整个锅炉机组系统进行严密性检查，包括：
 - a) 消除烟、风系统不应有的泄漏；
 - b) 消除汽、水、燃料的泄漏；
 - c) 确定试验锅炉系统已与其他非试验系统隔离。
- 4.3.3 对所有参与试验的仪表仪器进行检定或校准。
- 4.3.4 设备的实际状态和预先规定条件的任何偏离，均应记录在试验报告中。
- 4.3.5 试验前，锅炉系统应带负荷连续正常运行 48h 以上。
- 4.3.6 正式试验应在锅炉热工况稳定和燃烧调整 1h 后开始进行。
- 4.3.7 试验过程中允许的运行参数偏差见表 3。

表 3 运行参数的允许偏差

控 制 参 数		短期波动（相邻峰谷差）	观察值与试验周期内运行平均值的偏差
蒸汽压力	设定值 $\geq 3.8\text{MPa}$	4%（最大为 0.2MPa）	3%（最大为 0.3MPa）
	设定值 $< 3.8\text{MPa}$	0.15MPa	0.1MPa
给水流量 （锅筒锅炉）	连续给水	10%	3%
	非连续给水	—	—
省煤器/冷凝器出口或锅炉出口（无省煤器时）烟气中氧气体积分数		0.4	0.2
过热蒸汽温度		小于 450℃时为 10℃， 大于等于 450℃时为 5℃	5℃
燃气量		10%	—
过热蒸汽流量		4%	3%
$\varphi_{\text{CO},\text{fg}}$		3×10^{-5}	1×10^{-5}

4.4 预备性试验

4.4.1 正式试验前，按正式试验的测试项目及要求进行一次预备性试验。

4.4.2 预备性试验的目的如下：

- a) 检查锅炉系统运行状态；
- b) 检验测试装置和仪器。

4.4.3 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。

4.5 正式试验

4.5.1 正式试验持续时间不少于 2h，测量时间间隔见表 4。

表 4 试验测量时间间隔

测 量 项 目	时 间 间 隔
蒸汽流量、压力、温度	5min~15min
蒸汽锅炉给水流量、压力、温度	5min~15min
热水锅炉循环流量	5min~15min
热水锅炉进出水温度	5min
空气压力、温度	5min~15min
烟气压力、温度、湿度、成分	5min~15min
环境压力、温度	10min~20min
蒸汽湿度	20min~30min
积算参数	试验起、止时准确记测 1 次；试验中每 30min 记测 1 次
其他次要参数	15min~30min

4.5.2 试验工况开始直至结束，过热蒸汽流量、压力、温度，给水流量、压力、温度，热水锅炉循环流量、压力、温度，锅筒水位，燃烧工况，燃料量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。

4.5.3 测试期间不允许进行可能干扰试验工况的任何操作，如定期排污等。

4.6 试验记录

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

4.6.2 试验数据应全部记录在相关表格中。

4.6.3 试验数据记录至少应包括下列项目：

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

4.7 试验工况及试验数据的舍弃

4.7.1 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，应考虑将此试验工况舍弃；如果受影响的部分是在试验的开头或结尾处，且测试时间符合表 4 的要求，可部分舍弃异常数据；如有必要，应重复该试验工况。

4.7.2 凡出现下列情况之一时，该试验工况应作废：

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

4.8 锅炉热效率试验

4.8.1 锅炉热效率试验有两种方法，即输入-输出热量法和热损失法，本标准推荐采用热损失法。

4.8.2 进行验收或定型试验时，在额定负荷下至少应做 2 次试验，若 2 次试验结果的偏差超过 1%，应重复试验，直到试验结果落在允许偏差范围内，其试验结果为 2 次试验的平均值。其他试验，在所要求的负荷下至少应进行 1 次完整试验。

5 仪表仪器及测试方法

5.1 主要测量项目

验收或定型试验主要测量项目见表 5。

表 5 锅炉热效率试验主要测量项目

序 号	主要测量项目	说 明
一、	锅炉热效率	
1.	输入-输出热量法：	
1)	燃料量	实际测量
2)	燃料成分分析	GB/T 13610
3)	燃料发热量	计算法
4)	进入系统的燃料和空气温度	
5)	过热蒸汽、饱和蒸汽的流量、压力和温度	
6)	给水和减温水流量、压力和温度	
7)	热水锅炉进出水温度、压力和循环水流量	
8)	泄漏与排污流量	如果存在
9)	锅筒内压力及水位	
2.	热损失法：	
1)	燃料量	通过计算迭代得出
2)	燃料发热量	计算法
3)	燃料成分分析	GB/T 13610
4)	进入系统的燃料和空气温度	

表 5 (续)

序 号	主要测量项目	说 明
5)	过热蒸汽、饱和蒸汽的流量、压力和温度	
6)	给水和减温水流量、压力和温度	
7)	热水锅炉进出水温度、压力和循环水流量	
8)	泄漏与排污流量	如果存在
9)	锅筒内压力及水位	
10)	最后一级冷凝受热面出口烟气成分	
11)	最后一级冷凝受热面出口烟气温度、湿度	
12)	进入系统的燃料和空气温度	
13)	环境干、湿球温度和大气压力	
14)	锅炉系统散热面积	测量或厂家/用户提供
15)	辅助设备功率消耗	系统边界内有关设备
二、	其他试验项目	
1.	$\varphi_{\text{NO}_x.\text{fg}}$ 、 $\varphi_{\text{SO}_x.\text{fg}}$ 排放浓度:	
1)	排烟中 $\varphi_{\text{O}_2.\text{fg}}$	
2)	排烟中 $\varphi_{\text{NO}.\text{fg}}$	
3)	排烟中 $\varphi_{\text{SO}_2.\text{fg}}$	

5.2 仪表仪器

5.2.1 验收或定型试验中，主要测量项目所用仪表仪器宜为专用设备。

5.2.2 主要测量项目的仪表仪器应在检定或校准合格期内。

5.2.3 如果运行表计达到试验要求的精度等级，并具备法定计量部门出具的检定或校准合格证，也可采用运行表计。

5.2.4 如果需要，验收或定型试验主要（或部分）测量仪器可在试验后进行复校，如发现异常，则应对所测数据进行修正或舍弃所测数据。

5.2.5 经参与试验的各方协商同意，也可采用未包含在本标准规定范围的仪器仪表进行测量。

5.2.6 验收试验中，主要测试项目选用仪表仪器的测量不确定度按表 6 的规定。

表 6 主要测试项目仪表仪器的最大允许测量不确定度

序 号	测 量 项 目		B 类扩展不确定度
1	水和蒸汽	流量	1.0%
		压力	1.0%
		温度	0.5%
2	热水锅炉进出水	循环流量	1.0%
		温度	0.06℃
		压力	1.6%
3	燃气量		2.0%
4	冷凝烟气	温度	0.5%
		湿度	2.0%
5	烟气成分	氧量 ($\varphi_{O_2,fg}$)	1.0%
		二氧化碳 ($\varphi_{CO_2,fg}$)	1.0%
		一氧化碳 ($\varphi_{CO,fg}$)	5.0%
		二氧化硫 ($\varphi_{SO_2,fg}$)	2.0%
		一氧化氮 ($\varphi_{NO,fg}$)	5.0%
		碳氢	5.0%
6	空气	压力	1.0%
		温度	0.5%
7	天然气气体组分浓度范围 (摩尔分数)	> 0.0~0.1	0.01%
		> 0.1~1.0	0.04%
		> 1.0~5.0	0.05%
		> 5.0~10.0	0.06%
		> 10.0	0.08%

5.3 温度测量

5.3.1 温度测量的一般要求如下：

- a) 温度测量所用测量元件见表 7；
- b) 温度测点应选择在管道或通道横截面上速度与温度分布均匀的部位。烟道横截面面积 $<1\text{m}^2$ 时，应至少布置 4 个测点；烟道横截面积 $\geq 1\text{m}^2$ 时，验收试验或定型试验中的热效率测定应采用网格法测量。网格法等截面划分原则及代表点的确定见附录 A；
- c) 应采取必要措施，防止温度测量仪表因受传导、对流和辐射影响而导致测量数据失真；
- d) 采用热电偶测量温度时，热电偶导线不应与电源线并行放置，以避免干扰。

表 7 温度测量元件

测 量 元 件	测 量 对 象	测温范围/℃
玻璃水银温度计	水箱温度和环境温度	0~500
热电偶温度计	水及蒸汽、燃气、空气、非冷凝烟气等	100~1 800
铂电阻温度计	热水锅炉进、出水温度、非冷凝烟气温度、空气温度、燃气温度等	-50~500
自伴热抽气式温湿度测试装置	冷凝烟气温度	0~150
干湿球温度计	空气	-50~50

5.3.2 蒸汽温度测量的要求如下：

- a) 测量管道内的蒸汽温度时，应采用插入式套管，套管插入深度应达到 1/3 管内径，流经管内的蒸汽温度应接近均匀；
- b) 过热蒸汽温度测点应最大限度地接近过热器进、出口，且应远离束状流（如喷水减温器后）一定距离。

注：饱和蒸汽温度由《水和蒸汽的性质》查得。

5.3.3 给水温度（热水锅炉进水温度）应尽可能在靠近省煤器进口处测量。

5.3.4 非冷凝烟气和空气温度测量的要求如下：

- a) 根据试验内容，温度测点可布置在相应受热面的进、出口处；
- b) 测量截面应远离通道的转弯、有阻碍物或变径处；
- c) 对于截面积 $\geq 1\text{m}^2$ 的烟道，应采用网格法测量（见附录 A）；
- d) 当被测量截面速度场或温度场有一项较均匀时，可采用代表点测量。如果被测量截面存在明显的烟气分层流动现象，则应采用流量加权的方法计算得到该截面的温度加权平均值；
- e) 干、湿球温度计应放置在避风、避热源、遮阳并靠近风机进风口处。

5.3.5 测量冷凝烟气温度时，本标准推荐采用自伴热抽气式烟气温度测量方法，其测试原理见附录 B。测量时采用多代表点法，同一烟道截面上至少应布置 4 个测点，如没有可靠的流速数据，不能采用流量加权计算平均烟气温度，则按照未采用流量加权的温度或氧浓度加权计算排烟温度，其计算方法见 8.5.2.2。测点布置要求参见 5.3.4，所选取烟道横截面在烟气流速均匀的条件下，尽可能靠近最后一级冷凝受热面出口（原则上距最后一级冷凝受热面出口不超过 1m）。

5.3.6 对于气体燃料，应尽可能地接近燃烧器入口进行温度测量。

5.4 烟气湿度测量

5.4.1 测量非冷凝烟气，可使用湿敏电容进行湿度测量（其不确定度应不高于 0.1%），其测点位置见 5.3.4。

5.4.2 测量冷凝烟气，本标准推荐采用自伴热抽气式烟气湿度测量方法，其测量原理见附录 B。其测点布置要求和平均湿度的计算方法见 5.3.5。

5.5 压力及压差测量

5.5.1 进行压力及压差测量时，压力计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，上限适用压力波动小的情况）。

5.5.2 汽水系统压力与压差测量要求如下：

- a) 压力测点尽量靠近相应设备进、出口，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；

b) 测量汽水压力时，应对取压点和测量仪器之间的高差进行修正。

5.5.3 烟风道静压的测量要求如下：

- a) 静压测孔应开在烟（风）道直段上，孔径宜为 2mm～3mm，尽可能远离挡板、弯头等阻力部件及涡流区；
- b) 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。

5.6 流量测定

5.6.1 流量一般间接测定，通过测量介质静压、动压和温度，计算流量。流量测量的仪器装置见表 8。

表 8 流量测量仪器装置

仪器装置	测量对象	检定或标定要求	备 注
称重箱	给水	标定达到表 6 规定	
容积箱	给水	标定达到表 6 规定	
孔板或喷嘴、超声波流量计	水、蒸汽和燃气	标定达到表 6 规定	符合 GB/T 2624.2 或 GB/T 2624.3 的要求，则不需检定
标准动压测定管（皮托管）	空气、烟气	可不标定	
笛形管、文丘里、机翼		标定	
靠背式动压测定管		标定	

5.6.2 蒸汽流量测量的要求如下：

- a) 过热蒸汽流量采用锅炉给水流量并考虑给水流量测量点之后至过热器出口的任何补充或抽取的流量，如连续排污、过热器减温器减温水流量、锅炉循环泵的注水、汽包水位的变化等进行修正后的结果。试验期间，还应对在上述区段内可能的泄漏量进行测量和记录，并在计算过热蒸汽流量时记入；
- b) 当锅炉验收试验与汽轮机验收试验同步进行时，可直接采用汽轮机试验中所得的主蒸汽流量。

5.6.3 给水和减温水流量测量的要求如下：

- a) 采用孔板、喷嘴、超声波流量计测量给水、减温水流量、热水锅炉进出水，其检定或校准要求应符合表 6 的规定；
- b) 蒸汽锅炉给水的最低压力应比水温实测值所对应的饱和压力高 0.25MPa，或水的实测温度应比测量的最低压力所对应的饱和温度低 15℃；热水锅炉测试时的压力应保证出水温度比该压力下的饱和温度至少低 20℃。

5.6.4 烟气及空气流量测量的要求如下：

- a) 通过测量烟（风）道动压，求得烟（风）流速，从而确定烟（空气）流量；
- b) 根据被测量介质不同，推荐采用不同的动压测定装置，见表 8。测量点的确定见附录 A；
- c) 应在测量动压的同时，测量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中各种主要成分的体积分数，以计算烟气密度。常用气体浓度单位换算可查 GB/T 10184；

d) 测孔管座应与管道壁面垂直,测量动压时,测量管动压测孔应正对气流的来流方向。

5.7 燃料量

燃料量测量的要求如下:

- a) 采用热损失法时,可通过计算的方法得到燃料量;
- b) 燃气流量测量时,应同时测量燃气的压力、温度,并将流量计的读数换算成标准状况下的容积流量。

5.8 取样和化验

5.8.1 燃料取样的要求如下:

- a) 燃气在整个试验过程中应按均等时间间隔、等体积取样。多个样品,不确定度取 0.5%;单一样品,不确定度取 1.0%;
- b) 燃气取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系统的自然扰流装置(如孔板、阀门挡板等)之后的垂直管道上,取样前应对取样管路进行排放冲洗;
- c) 气体燃料的总取样量应不少于 10L。

5.8.2 蒸汽取样的要求见附录 C。取样次数应不少于 5 次,两次蒸汽湿度之间的差值应不大于 0.2。

5.8.3 烟气取样的要求如下:

- a) 烟气取样位置一般在最后一级冷凝受热面出口烟道截面,与相应烟温测点尽量靠近,具体要求见 5.3.4 和 5.3.5;
- b) 对于需要采用伴热取样管线取样的气体组分,可采用代表点取样。

5.8.4 取样管和连接管材料的要求如下:

- a) 取样管路材料应保证在工作温度下不与样品发生反应及在高温环境下的刚性;
- b) 在试验前和试验过程中应对取样管和连接管进行检查,确保无泄漏、无堵塞。

5.8.5 燃气化验方法和要求见 GB/T 13610,气体组成分析的不确定度见表 6。气体的低位和高位发热量按照式(1)计算:

$$Q_{\text{net,ar}} = \sum_{i=1}^N \varphi_i \cdot Q_i \quad \text{或} \quad Q_{\text{gr,ar}} = \sum_{i=1}^N \varphi_i \cdot Q_i \quad \dots\dots\dots (1)$$

式中:

$Q_{\text{net,ar}}$ ——燃料的低位发热量, MJ/m³;

φ_i ——气体燃料中相应各可燃气体的体积分数, %;

Q_i ——组分 i 的理想气体体积发热量(高位或低位), MJ/m³;

$Q_{\text{gr,ar}}$ ——燃料的高位发热量, MJ/m³。

5.8.6 本标准推荐在整个试验过程中连续监测烟气成分,表 9 为常用的烟气分析仪器。

表 9 烟气分析仪器

烟 气 成 分	测 量 仪 器	备 注
$\varphi_{\text{O}_2.\text{fg}}$	磁氧量计 氧化锆氧量计 定电位电解式烟气分析仪	
$\varphi_{\text{CO}_2.\text{fg}}$	非分散红外线吸收仪 气相色谱仪	
$\varphi_{\text{CO.fg}}$	非分散红外线吸收仪 气相色谱仪 定电位电解式烟气分析仪	首选仪器：非分散红外线吸收仪
$\varphi_{\text{SO}_2.\text{fg}}$	非分散红外线吸收仪 紫外线脉冲荧光法分析仪	首选仪器：紫外线脉冲荧光法分析仪
$\varphi_{\text{NO}_x.\text{fg}}$	化学发光法分析仪 非分散紫外线吸收仪 定电位电解式烟气分析仪	首选仪器：化学发光法分析仪
$\varphi_{\text{H}_2.\text{fg}}$	色谱仪	
$\varphi_{\sum \text{C}_m\text{H}_n.\text{fg}}$	非分散红外线吸收仪 色谱仪	首选仪器：色谱仪

6 结果计算

6.1 输出热量

热水锅炉输出热量通过式（2）进行计算：

$$Q_{r,\text{O.HW}} = Mr_{\text{CW.FI}}(H_{\text{HW.Lv}} - H_{\text{HW.En}}) + Q_{r,\text{HW.Cond}} \dots\dots\dots (2)$$

式中：

- $Q_{r,\text{O.HW}}$ ——热水锅炉输出热量，kJ/h；
- $Mr_{\text{CW.FI}}$ ——热水锅炉循环水量，kg/h；
- $H_{\text{HW.Lv}}$ ——热水锅炉出水焓，kJ/kg；
- $H_{\text{HW.En}}$ ——热水锅炉进水焓，kJ/kg；
- $Q_{r,\text{HW.Cond}}$ ——热水锅炉最后一级冷凝受热面输出热量，kJ/h。按式（3）计算：

$$Q_{r,\text{HW.Cond}} = Mr_{\text{Cond.FW.FI}}(H_{\text{Cond.Lv}} - H_{\text{Cond.En}}) \dots\dots\dots (3)$$

式中：

- $Mr_{\text{Cond.FW.FI}}$ ——最后一级冷凝受热面给水流量，kg/h；
- $H_{\text{Cond.Lv}}$ ——最后一级冷凝受热面出水焓，kJ/kg；
- $H_{\text{Cond.En}}$ ——最后一级冷凝受热面进水焓，kJ/kg。

饱和蒸汽锅炉输出热量通过式（4）计算：

$$Q_{r,\text{O.Sat}} = \left[Mr_{\text{FW.FI}} \left(H_{\text{Sat}} - H_{\text{FW}} - \frac{\gamma \cdot \omega}{100} \right) - Mr_{\text{BW.Sa}} \cdot \gamma \right] + Q_{r,\text{Sat.Cond}} \dots\dots\dots (4)$$

式中：

- $Q_{r,\text{O.Sat}}$ ——饱和蒸汽锅炉输出热量，kJ/h；
- $Mr_{\text{FW.FI}}$ ——锅炉给水量，kg/h；

H_{Sat} ——饱和蒸汽焓, kJ/kg;

H_{FW} ——给水焓, kJ/kg;

γ ——水的汽化潜热, kJ/kg;

ω ——饱和蒸汽湿度, %。测试方法可按附录 C 规定;

$Mr_{\text{BW.Sa}}$ ——锅水取样量, kg/h;

$Q_{\text{Sat.Cond}}$ ——饱和蒸汽锅炉最后一级冷凝受热面输出热量, kJ/h。按式(5)计算:

$$Q_{\text{Sat.Cond}} = Mr_{\text{Cond.FW.Fl}}(H_{\text{Cond.Lv}} - H_{\text{Cond.En}}) \quad \dots\dots\dots (5)$$

过热蒸汽锅炉输出热量在测量给水流量时通过式(6)进行计算, 在测量过热蒸汽流量时通过式(8)进行计算:

$$Q_{\text{O.Sut}} = [Mr_{\text{FW.Fl}}(H_{\text{Sut}} - H_{\text{FW}}) + Mr_{\text{WJ}}(H_{\text{Sut}} - H_{\text{WJ}}) - Mr_{\text{BW.Sa}}(H_{\text{Sut}} - H_{\text{Sat}} + \gamma)] + Q_{\text{Sut.Cond}} \quad \dots\dots\dots (6)$$

式中:

$Q_{\text{O.Sut}}$ ——过热蒸汽锅炉输出热量, kJ/h;

H_{Sut} ——过热蒸汽焓, kJ/kg;

Mr_{WJ} ——喷水流量, kg/h;

H_{WJ} ——喷水焓, kJ/kg;

$Q_{\text{Sut.Cond}}$ ——过热蒸汽锅炉最后一级冷凝受热面输出热量, kJ/h。按式(7)计算:

$$Q_{\text{Sut.Cond}} = Mr_{\text{Cond.FW.Fl}}(H_{\text{Cond.Lv}} - H_{\text{Cond.En}}) \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$Q_{\text{O.Sut}} = [(Mr_{\text{Sut.Fl}} - Mr_{\text{WJ}} + Mr_{\text{Sut.Sa}})(H_{\text{Sut}} - H_{\text{FW}}) + Mr_{\text{WJ}}(H_{\text{Sut}} - H_{\text{WJ}}) + Mr_{\text{BW.Sa}}(H_{\text{Sat}} - \gamma - H_{\text{FW}})] + Q_{\text{Sut.Cond}} \quad \dots\dots\dots (8)$$

式中:

$Mr_{\text{Sut.Fl}}$ ——过热蒸汽流量, kg/h;

$Mr_{\text{Sut.Sa}}$ ——过热蒸汽取样量, kg/h。

对带再热循环的锅炉机组, 对每一级再热应在输出热量公式中添加一项。第一级再热的附加输出热量见式(9):

$$Q_{\text{Rh}} = Mr_{\text{Sut.Rh}}(H_{\text{Sut.Rh.Lv}} - H_{\text{Sut.Rh.En}}) + Mr_{\text{WJ.Rh}}(H_{\text{WJ.Rh.Lv}} - H_{\text{WJ.Rh.En}}) \quad \dots\dots\dots (9)$$

式中:

Q_{Rh} ——再热蒸汽输出热量, kJ/h;

$Mr_{\text{Sut.Rh}}$ ——再热蒸汽质量流量, kg/h;

$H_{\text{Sut.Rh.Lv}}$ ——再热蒸汽出口焓, kJ/kg;

$H_{\text{Sut.Rh.En}}$ ——再热蒸汽进口焓, kJ/kg;

$Mr_{\text{WJ.Rh}}$ ——再热蒸汽的喷水质量流量, kg/h;

$H_{\text{WJ.Rh.Lv}}$ ——再热蒸汽的喷水出口焓, kJ/kg;

$H_{\text{WJ.Rh.En}}$ ——再热蒸汽的喷水进口焓, kJ/kg。

试验过程中, 如果连续排污, 则输出热量中需加上这部分排污水携带的热量, 计算方法见式(10):

$$Q_{r_{Bd}} = Mr_{w_{Bd}}(H_{sw_{Bd}} - H_{FW}) \quad \dots\dots\dots (10)$$

式中：

$Q_{r_{Bd}}$ ——排污水携带热量，kJ/h；

$Mr_{w_{Bd}}$ ——排污水质量流量，kg/h；

$H_{sw_{Bd}}$ ——锅筒压力对应的饱和水焓，kJ/kg。

6.2 输入热量

基于低位发热量，输入热量计算方法见式（11）：

$$Q_{r_i} = Q_{r_F} = Vr_{F,Fl} \cdot Q_{net,ar} \quad \dots\dots\dots (11)$$

式中：

Q_{r_i} ——输入热量，kJ/h；

Q_{r_F} ——燃料的输入热量，kJ/h；

$Vr_{F,Fl}$ ——燃料的体积流量，m³/h；

$Q_{net,ar}$ ——燃料的低位发热量，kJ/m³。

基于高位发热量，输入热量计算方法见式（12）：

$$Q_{r_i} = Q_{r_F} = Vr_{F,Fl} \cdot Q_{gr,ar} \quad \dots\dots\dots (12)$$

式中：

$Q_{gr,ar}$ ——燃料的高位发热量，kJ/m³。

6.3 热量平衡

进入系统的热量等于离开系统的热量，即满足式（13）：

$$Q_{r_F} + Q_{r_B} = Q_{r_O} + Q_{r_L} \quad \dots\dots\dots (13)$$

式中：

Q_{r_B} ——外来热量，kJ/h；

Q_{r_O} ——输出热量，kJ/h；

Q_{r_L} ——损失热量，kJ/h。

6.4 锅炉热效率

6.4.1 如无特别说明，本标准后续提到的锅炉热效率均为燃料效率。

6.4.2 通过热损失法（能量平衡法或反平衡法）计算锅炉热效率见式（14）：

$$\eta = 100 \times \frac{Q_{r_O}}{Q_{r_F}} = 100 - 100 \times \frac{Q_{r_L}}{Q_{r_F}} + 100 \times \frac{Q_{r_B}}{Q_{r_F}} = 100 - q_{pL} + q_{pB} \quad \dots\dots\dots (14)$$

式中：

η ——锅炉热效率，%；

q_{pL} ——基于燃料输入的热损失，%；

q_{pB} ——基于燃料输入的外来热量，%。

6.4.3 通过输入-输出法（正平衡法）计算锅炉热效率，基于低位发热量的计算见式（15），基于高位发热量的计算见式（16）：

$$\eta = 100 \times \frac{Q_{rO}}{V_{r,FL,M} \cdot Q_{net,ar}} \quad \dots\dots\dots (15)$$

式中:

$V_{r,FL,M}$ ——实际测量的燃料累积流量, m^3/h 。

$$\eta = 100 \times \frac{Q_{rO}}{V_{r,FL,M} \cdot Q_{gr,ar}} \quad \dots\dots\dots (16)$$

6.4.4 锅炉热效率计算的收敛度宜采用 $10^{-5}\%$ 量级。

6.5 燃料特性

6.5.1 天然气的高位发热量和低位发热量参见附录 D。

6.5.2 气体燃料分析以容积百分数来表示各碳氢化合物和其他组成成分。

6.5.3 燃料气携带水蒸气量由式(17)计算得出:

$$V_{F,H_2O,g} = \frac{\rho_{F,g} \cdot h_{ab,F}}{0.804} \quad \dots\dots\dots (17)$$

式中:

$V_{F,H_2O,g}$ ——每立方米气体燃料所携带的水蒸气量, m^3/m^3 ;

$\rho_{F,g}$ ——干燃料气体密度, kg/m^3 ;

$h_{ab,F}$ ——气体燃料绝对湿度, 指每千克干气体燃料中水蒸气的质量, kg/kg ;

0.804——水蒸气密度, kg/m^3 。

6.6 燃烧空气性质

6.6.1 空气绝对湿度

空气绝对湿度计算见式(18):

$$h_{ab,a} = 0.622 \times \frac{h_{RH,a} p_{st,Sat,t_a} / 100}{p_{at} - h_{RH,a} p_{st,Sat,t_a} / 100} \quad \dots\dots\dots (18)$$

式中:

$h_{ab,a}$ ——空气的绝对湿度, 指每千克干空气中水蒸气的质量, kg/kg ;

$h_{RH,a}$ ——按干、湿球温度查得的空气相对湿度, %;

p_{at} ——当地大气压力, Pa;

p_{st,Sat,t_a} ——在 t_a 温度下的水蒸气饱和压力, Pa。在 $0^\circ C \sim 50^\circ C$ 范围内, 按式(19)计算:

$$p_{st,Sat,t_a} = 611.7927 + 42.7809t_a + 1.6883t_a^2 + 1.2079 \times 10^{-2}t_a^3 + 6.1637 \times 10^{-4}t_a^4 \quad \dots\dots\dots (19)$$

式中:

t_a ——被测空气温度, $^\circ C$ 。

6.6.2 理论干空气量

理论干空气量由式(20)计算得出:

$$V_{a,d,th,g} = \frac{1}{21} \left(0.5\varphi_{CO,g} + 0.5\varphi_{H_2,g} + 1.5\varphi_{H_2S,g} + \sum \left(m + \frac{n}{4} \right) \varphi_{\sum C_m H_n,g} - \varphi_{O_2,g} \right) \quad \dots\dots\dots (20)$$

式中:

$V_{a,d,th,g}$ ——燃用天然气的理论干空气量, m^3/m^3 ;

$\varphi_{CO,g}$ 、 $\varphi_{H_2,g}$ 、 $\varphi_{H_2S,g}$ 、 $\varphi_{\sum C_m H_n,g}$ 、 $\varphi_{O_2,g}$ ——天然气中一氧化碳、氢气、硫化氢、碳氢化合物、氧气的体积分数, %;

m 、 n ——碳氢化合物中碳、氢原子数。

6.6.3 过量空气系数

过量空气系数的计算见式(21)，基于干基 O_2 分析的排烟处过量空气系数由式(22)计算得出：

$$\alpha = \frac{V_a}{V_{a,th}} \quad \dots\dots\dots (21)$$

式中：

α ——过量空气系数；

V_a ——对应每立方米燃料实际送入炉内的空气量， m^3/m^3 ；

$V_{a,th}$ ——入炉燃料完全燃烧所需的空气量，称为理论空气量， m^3/m^3 。

$$\alpha = \frac{21}{21 - 79 \frac{\varphi_{O_2,fg} - (0.5\varphi_{CO,fg} + 0.5\varphi_{H_2,fg} + 2\varphi_{CH_4,fg})}{\varphi_{N_2,fg} - \frac{\varphi_{N_2,g}(\varphi_{RO_2,fg} + \varphi_{CO,fg} + \varphi_{CH_4,fg})}{\varphi_{CO_2,g} + \varphi_{CO,g} + \sum m\varphi_{\sum C_mH_n,g} + \varphi_{H_2S,g}}} \quad \dots\dots\dots (22)$$

式中：

$\varphi_{RO_2,fg}$ ——烟气中 RO_2 的体积分数，为烟气中 CO_2 和 SO_2 的体积分数之和，%。

6.6.4 实际干空气量

实际干空气量由式(23)计算得出：

$$V_{a,d,g} = \alpha \cdot V_{a,d,th,g} \quad \dots\dots\dots (23)$$

式中：

$V_{a,d,g}$ ——对应每立方米燃料的实际干空气量， m^3/m^3 。

6.6.5 湿空气量

湿空气量为干空气量与空气中水蒸气量之和，计算见式(24)：

$$V_{a,w,g} = V_{a,d,g} + V_{a,H_2O,g} \quad \dots\dots\dots (24)$$

式中：

$V_{a,w,g}$ ——对应每立方米燃料的湿空气量， m^3/m^3 ；

$V_{a,H_2O,g}$ ——空气携带的水蒸气量， m^3/m^3 。按式(25)计算：

$$V_{a,H_2O,g} = 1.293 \cdot h_{ab,a} \cdot V_{a,d,g} / 0.804 = 1.293 \cdot h_{ab,a} \cdot \alpha V_{a,d,th,g} / 0.804 \quad \dots\dots\dots (25)$$

式中：

1.293——干空气密度， kg/m^3 。

6.7 烟气产物

6.7.1 未冷凝烟气中的总水分由式(26)计算得出：

$$V_{fg,H_2O,g} = V_{F,H_2O,g} + V_{a,H_2O,g} + V_{F,H_2,H_2O,g} \quad \dots\dots\dots (26)$$

式中：

$V_{fg,H_2O,g}$ ——烟气中的总水分，包括燃料带入的水分、空气带入的水分和燃料中氢燃烧产生的水分， m^3/m^3 ；

$V_{F,H_2,H_2O,g}$ ——每立方米气体燃料中氢燃烧产生的水蒸气量, m^3/m^3 。按式(27)计算:

$$V_{F,H_2,H_2O,g} = \frac{1}{100} \left(\varphi_{H_2S,g} + \varphi_{H_2,g} + \sum \frac{n}{2} \varphi_{\sum C_m H_n,g} \right) \dots\dots\dots (27)$$

6.7.2 冷凝后烟气中携带的水蒸气量由式(28)计算得出, 烟气中的水蒸气冷凝量由式(30)计算得出:

$$V_{fg, Cond, H_2O,g} = 1.338 \cdot h_{ab,fg} \cdot V_{fg,d,g} / 0.804 \dots\dots\dots (28)$$

式中:

$V_{fg, Cond, H_2O,g}$ ——对应每立方米燃料的最后一级冷凝受热面出口烟气中水蒸气含量, m^3/m^3 ;

$V_{fg,d,g}$ ——每立方米燃料燃烧生成的干烟气体积, m^3/m^3 。按式(29)计算:

$$V_{fg,d,g} = \frac{\varphi_{CO_2,g} + \varphi_{CO,g} + \varphi_{H_2S,g} + \sum m \varphi_{C_m H_n,g}}{100} + 0.79 V_{a,d,th,g} + \frac{\varphi_{N_2,g}}{100} + (\alpha - 1) V_{a,d,th,g} \dots\dots\dots (29)$$

$h_{ab,fg}$ ——最后一级冷凝受热面冷凝后烟气的含湿量, kg/kg ;

1.338——干烟气密度, kg/m^3 。

$$V_{fg, Cond, H_2O,l} = V_{fg,H_2O,g} - V_{fg, Cond, H_2O,g} \dots\dots\dots (30)$$

式中:

$V_{fg, Cond, H_2O,l}$ ——每标准立方米燃料燃烧生成的烟气经最后一级冷凝受热面后冷凝下来的水蒸气量, m^3/m^3 。

6.8 基准温度

进入和离开锅炉系统的物质流(空气、燃料和烟气)均根据基准温度来计算显热损失和外来热量。本标准的基准温度为 $25^\circ C$ 。进入锅炉系统物质流的温度如果低于基准温度, 则外来热量为负值。

6.9 各项损失

6.9.1 干烟气损失

6.9.1.1 基于低位发热量的干烟气损失由式(31)计算得出:

$$q_{p,L,fg,d,net} = \frac{V_{fg,d,Cond,Lv} c_{p,fg,d} (t_{fg,Cond,Lv} - t_{fg,Cond,Re})}{Q_{net,ar}} \dots\dots\dots (31)$$

式中:

$q_{p,L,fg,d,net}$ ——基于低位发热量的干烟气损失, %;

$V_{fg,d,Cond,Lv}$ ——最后一级冷凝受热面出口每标准立方米燃料燃烧生成的干烟气体积, m^3/m^3 。按式(29)计算;

$c_{p,fg,d}$ ——最后一级冷凝受热面出口干烟气的平均比定压热容, $kJ/(m^3 \cdot ^\circ C)$ 。按式(32)计算:

$$c_{p,fg,d} = (\varphi_{CO_2,fg} c_{p,CO_2} + \varphi_{N_2,fg} c_{p,N_2} + \varphi_{O_2,fg} c_{p,O_2} + \varphi_{CO,fg} c_{p,CO} + \varphi_{H_2,fg} c_{p,H_2} + \varphi_{\sum C_m H_n,fg} c_{p,\sum C_m H_n}) / 100 \dots\dots (32)$$

式中:

c_{p,CO_2} 、 c_{p,N_2} 、 c_{p,O_2} 、 $c_{p,CO}$ 、 c_{p,H_2} 、 $c_{p,\sum C_m H_n}$ ——烟气中二氧化碳、氮气、氧气、一氧化碳、氢气、碳氢化合物的比定压热容, $kJ/(m^3 \cdot ^\circ C)$ 。按照附录 E 查表或计算。

$t_{\text{fg,Cond.Lv}}$ ——离开系统边界的烟气温度，℃；

$t_{\text{fg,Cond.Re}}$ ——离开系统边界的烟气基准温度，℃。

6.9.1.2 基于高位发热量的干烟气损失由式(33)计算得出：

$$q_{\text{p.L.fg.d.gr}} = \frac{V_{\text{fg,d,Cond.Lv}} c_{\text{p,fg,d}} (t_{\text{fg,Cond.Lv}} - t_{\text{fg,Cond.Re}})}{Q_{\text{gr.ar}}} \dots\dots\dots (33)$$

式中：

$q_{\text{p.L.fg.d.gr}}$ ——基于高位发热量的干烟气损失，%。

6.9.2 烟气中部分水蒸气冷凝引起的热量变化

6.9.2.1 基于低位发热量的最后一级冷凝受热面后烟气携带水蒸气而造成的显热损失由式(34)计算得出：

$$q_{\text{p.L.fg,Cond.net}} = \frac{V_{\text{fg,Cond.H}_2\text{O,g}} c_{\text{p,H}_2\text{O}} (t_{\text{fg,Cond.Lv}} - t_{\text{fg,Cond.Re}})}{Q_{\text{net.ar}}} \dots\dots\dots (34)$$

式中：

$q_{\text{p.L.fg,Cond.net}}$ ——基于低位发热量的烟气携带水蒸气损失，%；

$c_{\text{p,H}_2\text{O}}$ ——水蒸气的比定压热容，kJ/(m³·℃)。按照附录E计算。

6.9.2.2 基于高位发热量最后一级冷凝受热面后烟气携带水蒸气而造成的显热损失由式(35)计算得出：

$$q_{\text{p.L.fg,Cond.gr}} = \frac{V_{\text{fg,Cond.H}_2\text{O,g}} c_{\text{p,H}_2\text{O}} (t_{\text{fg,Cond.Lv}} - t_{\text{fg,Cond.Re}})}{Q_{\text{gr.ar}}} \dots\dots\dots (35)$$

式中：

$q_{\text{p.L.fg,Cond.gr}}$ ——基于高位发热量的烟气携带水蒸气损失，%。

6.9.2.3 基于低位发热量时，水蒸气冷凝后的汽化潜热被锅炉系统吸收，发生冷凝的水蒸气释放的热量对于锅炉系统损失而言应为负值，冷凝水的显热为正值，水蒸气冷凝引起的热量变化计算方法见式(36)：

$$q_{\text{p.L.fg,Cond.net,l}} = -\frac{0.804 \cdot V_{\text{fg,Cond.H}_2\text{O,l}} \cdot \gamma_{\text{Cond}}}{Q_{\text{net.ar}}} + \frac{0.804 \cdot V_{\text{fg,Cond.H}_2\text{O,l}} \cdot c_{\text{p,H}_2\text{O}} (t_{\text{fg,Cond.Lv}} - t_{\text{fg,Cond.Re}})}{Q_{\text{net.ar}}} \dots\dots\dots (36)$$

式中：

$q_{\text{p.L.fg,Cond.net,l}}$ ——基于低位发热量的发生冷凝的水蒸气汽化潜热被吸收造成的损失，为负值，%；

γ_{Cond} ——最后一级冷凝受热面中烟气平均压力下的水蒸气汽化潜热，kJ/kg。

6.9.2.4 基于高位发热量，水蒸气冷凝引起的热量变化计算方法见式(37)：

$$q_{\text{p.L.fg,Cond.gr,l}} = \frac{0.804 \cdot V_{\text{fg,Cond.H}_2\text{O,g}} \cdot \gamma_{\text{Cond}}}{Q_{\text{gr.ar}}} + \frac{0.804 \cdot V_{\text{fg,Cond.H}_2\text{O,l}} \cdot (H_{\text{fg,Cond.H}_2\text{O,l,Lv}} - H_{\text{fg,Cond.H}_2\text{O,l,Re}})}{Q_{\text{gr.ar}}} \dots\dots\dots (37)$$

式中：

$q_{\text{p.L.fg,Cond.gr,l}}$ ——基于高位发热量的发生冷凝的水蒸气汽化潜热被吸收造成的损失，%；

$H_{\text{fg,Cond.H}_2\text{O,l,Lv}}$ ——离开系统边界的烟气温度对应的冷凝水焓，kJ/kg；

$H_{\text{fg,Cond.H}_2\text{O,l,Re}}$ ——基准温度对应的冷凝水焓，kJ/kg。

6.9.3 烟气中一氧化碳、未燃碳氢物质造成的损失

6.9.3.1 基于低位发热量的烟气中一氧化碳、未燃碳氢物质造成的损失按式(38)计算:

$$q_{p,L,fg,CO,HC,net} = \frac{V_{fg,d,Cond,Lv} (123.36\varphi_{CO,fg} + 358.18\varphi_{CH_4,fg} + 107.98\varphi_{H_2,fg} + 590.79\varphi_{\sum C_m H_n,fg})}{Q_{net,ar}} \quad \dots\dots (38)$$

式中:

 $q_{p,L,fg,CO,HC,net}$ ——基于低位发热量的烟气中一氧化碳、未燃碳氢物质造成的损失, %。

6.9.3.2 基于高位发热量的烟气中一氧化碳、未燃碳氢物质造成的损失按式(39)计算:

$$q_{p,L,fg,CO,HC,gr} = \frac{V_{fg,d,Cond,Lv} (123.36\varphi_{CO,fg} + 398.40\varphi_{CH_4,fg} + 127.88\varphi_{H_2,fg} + 630.6\varphi_{\sum C_m H_n,fg})}{Q_{gr,ar}} \quad \dots\dots (39)$$

式中:

 $q_{p,L,fg,CO,HC,gr}$ ——基于高位发热量的烟气中一氧化碳、未燃碳氢物质造成的损失, %。

6.9.4 表面辐射和对流引起的损失

6.9.4.1 基于低位发热量由表面辐射和对流引起的损失, 按式(40)计算:

$$q_{r,L,Src,net} = \frac{1\,670 \cdot A_{Src}}{V_{r,Fl} \cdot Q_{net,ar}} \quad \dots\dots (40)$$

式中:

 $q_{r,L,Src,net}$ ——基于低位发热量由表面辐射和对流引起的损失, %; A_{Src} ——平面投影面积(对圆形取外表面积), 按 GB/T 8174 方法测量, m^2 ; 当测量值与厂家/用户给出的面积存在差异时, 采用测量数据;

1 670——经验系数, 估计 B 类标准不确定度为 20%。

6.9.4.2 基于高位发热量的表面辐射和对流引起的损失, 按式(41)计算:

$$q_{r,L,Src,gr} = \frac{1\,670 \cdot A_{Src}}{V_{r,Fl} \cdot Q_{gr,ar}} \quad \dots\dots (41)$$

式中:

 $q_{r,L,Src,gr}$ ——基于高位发热量由表面辐射和对流引起的损失, %。

6.10 外来热量

6.10.1 进入系统的干空气所携带的外来热量

6.10.1.1 基于低位发热量的进入系统的干空气所携带的外来热量由式(42)计算:

$$q_{p,B,a,d,net} = \frac{V_{a,d,g} c_{p,a,d} \cdot (t_{a,d} - t_{Re})}{Q_{net,ar}} \quad \dots\dots (42)$$

式中:

 $q_{p,B,a,d,net}$ ——基于低位发热量的进入系统的干空气所携带的外来热量, %; $c_{p,a,d}$ ——干空气的比定压热容, $kJ/(m^3 \cdot ^\circ C)$ 。按附录 E 查表或计算; $t_{a,d}$ ——进入系统的干空气温度, $^\circ C$ 。

6.10.1.2 基于高位发热量的进入系统的干空气所携带的外来热量由式(43)计算:

$$q_{p,B,a,d,gr} = \frac{V_{a,d,g} c_{p,a,d} \cdot (t_{a,d} - t_{Re})}{Q_{gr,ar}} \quad \dots\dots (43)$$

式中：

$q_{p.B.a.d.gr}$ ——基于高位发热量的进入系统的干空气所携带的外来热量，%。

6.10.2 空气中水分带来的外来热量

6.10.2.1 基于低位发热量的空气中水分带来的外来热量按式（44）计算：

$$q_{p.B.H_2O.net} = 100 \times \frac{V_{a.H_2O.g} (H_{a.H_2O.g.En} - H_{a.H_2O.g.Re})}{Q_{net.ar}} \quad (44)$$

式中：

$q_{p.B.H_2O.net}$ ——基于低位发热量的空气中水分带来的外来热量，%；

$H_{a.H_2O.g.En}$ ——进入锅炉空气温度对应的水蒸气焓，kJ/m³；

$H_{a.H_2O.g.Re}$ ——基准温度对应的进入锅炉空气的水蒸气焓，kJ/m³。

6.10.2.2 基于高位发热量的空气中水分带来的外来热量按式（45）计算：

$$q_{p.B.H_2O.gr} = 100 \times \frac{V_{a.H_2O.g} (H_{a.H_2O.g.En} - H_{a.H_2O.l.Re})}{Q_{gr.ar}} \quad (45)$$

式中：

$q_{p.B.H_2O.gr}$ ——基于高位发热量的空气中水分带来的外来热量，%；

$H_{a.H_2O.l.Re}$ ——基准温度对应的进入锅炉空气的水蒸气变为水的焓，kJ/m³。

6.10.3 燃料显热带来的外来热量

6.10.3.1 基于低位发热量的燃料显热带来的外来热量按式（46）计算：

$$q_{p.B.F.net} = 100 \times \frac{H_{F.En} - H_{F.Re}}{Q_{net.ar}} \quad (46)$$

式中：

$q_{p.B.F.net}$ ——基于低位发热量的燃料显热带来的外来热量，%；

$H_{F.En}$ ——进入系统的燃料温度对应的燃料焓，kJ/m³；

$H_{F.Re}$ ——进入系统的燃料基准温度对应的燃料焓，kJ/m³。

6.10.3.2 基于高位发热量的燃料显热带来的外来热量按式（47）计算：

$$q_{p.B.F.gr} = 100 \times \frac{H_{F.En} - H_{F.Re}}{Q_{gr.ar}} \quad (47)$$

式中：

$q_{p.B.F.gr}$ ——基于高位发热量的燃料显热带来的外来热量，%。

6.10.4 辅机设备功率的外来热量

6.10.4.1 基于低位发热量的辅机设备功率的外来热量按式（48）计算：

$$q_{p.B.X.net} = 100 \times \frac{Q_X \cdot C \cdot \frac{EX}{100}}{V_{r.FI} \cdot Q_{net.ar}} \quad (48)$$

式中：

$q_{p.B.X.net}$ ——基于低位发热量的辅机设备功率的外来热量，%；

Q_X ——输入的驱动能量，kW；

C ——系数，取 3 600；

EX ——总驱动效率，包括电机效率、电液耦合效率和传动效率，%。

6.10.4.2 基于高位发热量的辅机设备功率的外来热量按式(49)计算:

$$q_{p.B.X.gr} = 100 \times \frac{Q_x \cdot C \cdot \frac{EX}{100}}{V_{r.FI} \cdot Q_{gr.ar}} \quad \dots\dots\dots (49)$$

式中:

$q_{p.B.X.gr}$ ——基于高位发热量的辅机设备功率的外来热量, %。

7 修正

7.1 出力修正

7.1.1 以定型或验收为目的的热工性能试验, 每次试验的实测出力应为额定出力的 97%~105%。当蒸汽和给水的实测参数与设计不一致时, 锅炉的蒸发量应进行修正。

7.1.2 饱和蒸汽锅炉折算蒸发量按式(50)计算:

$$D_{ev.Sat.cr} = D_{ev.Sat.O.M} \frac{H_{Sat.M} - H_{FW.M}}{H_{Sat.D} - H_{FW.D}} \quad \dots\dots\dots (50)$$

式中:

$D_{ev.Sat.cr}$ ——饱和蒸汽锅炉折算蒸发量, t/h;

$D_{ev.Sat.O.M}$ ——实测饱和蒸汽锅炉输出蒸发量, t/h;

$H_{Sat.M}$ ——实测饱和蒸汽焓, kJ/kg;

$H_{FW.M}$ ——实测给水焓, kJ/kg;

$H_{Sat.D}$ ——设计饱和蒸汽焓, kJ/kg;

$H_{FW.D}$ ——设计给水焓, kJ/kg。

7.1.3 过热蒸汽锅炉折算蒸发量按式(51)计算:

$$D_{ev.Sut.cr} = D_{ev.Sut.O.M} \frac{H_{Sut.M} - H_{FW.M}}{H_{Sut.D} - H_{FW.D}} \quad \dots\dots\dots (51)$$

式中:

$D_{ev.Sut.cr}$ ——过热蒸汽锅炉折算蒸发量, t/h;

$D_{ev.Sut.O.M}$ ——实测过热蒸汽锅炉输出蒸发量, t/h;

$H_{Sut.M}$ ——实测过热蒸汽焓, kJ/kg;

$H_{Sut.D}$ ——设计过热蒸汽焓, kJ/kg。

7.2 给水温度偏离设计值的修正

7.2.1 蒸汽锅炉的实际给水温度与设计值之差应不大于 $\pm 10^\circ\text{C}$ 。当实际给水温度与设计给水温度之偏差超过 -10°C 时, 应由省煤器(冷凝器)制造厂家提供换热效率修正曲线进行修正。

7.2.2 热水锅炉的进水温度和出水温度与设计值之差应不大于 $\pm 5^\circ\text{C}$, 当实际进出水温平均值与设计温度平均值之偏差超过 -5°C 时, 应由省煤器(冷凝器)制造厂家提供换热效率修正曲线进行修正。

8 不确定度分析

8.1 概述

不确定度分析是定量表达试验结果精确度的一种方法。试验前和试验后的不确定度分析是完整性试验不可缺少的内容。表 10 规定了锅炉热效率的典型扩展不确定度范围。

表 10 冷凝锅炉热效率的典型扩展不确定度范围

烟气温度、成分测量方法	能量平衡法/%	输入-输出法/%
冷凝锅炉（网格法）	0.5	2.0
冷凝锅炉（其他）	0.7	2.0

8.1.1 不确定度分析原则

8.1.1.1 测量过程中随机效应和系统效应均会导致测量不确定度。随机效应引起的不确定度与时间变化有关，系统效应引起的不确定度不随时间变化。本标准将空间变化性作为系统效应引起不确定度的潜在来源。

8.1.1.2 测量不确定度一般由若干分量组成，每个分量用其概率分布的标准偏差估计值表征，称标准不确定度。用标准不确定度表示的各分量用 u_i 表示。根据对 X_i （输入量）的一系列测得值 x_i 得到实验标准偏差的方法为 A 类评定。根据有关信息估计的先验概率分布得到标准偏差估计值的方法为 B 类评定。

8.1.2 参数变化特性的模型

8.1.2.1 锅炉性能试验过程中烟气温度和成分等参数随空间与时间变化，来自于物理过程而不是试验误差。

8.1.2.2 假定参数不随时间和/或空间变化，为定值模型，见图 4；假定参数随时间、空间或二者连续变化，为连续变量模型，见图 5。

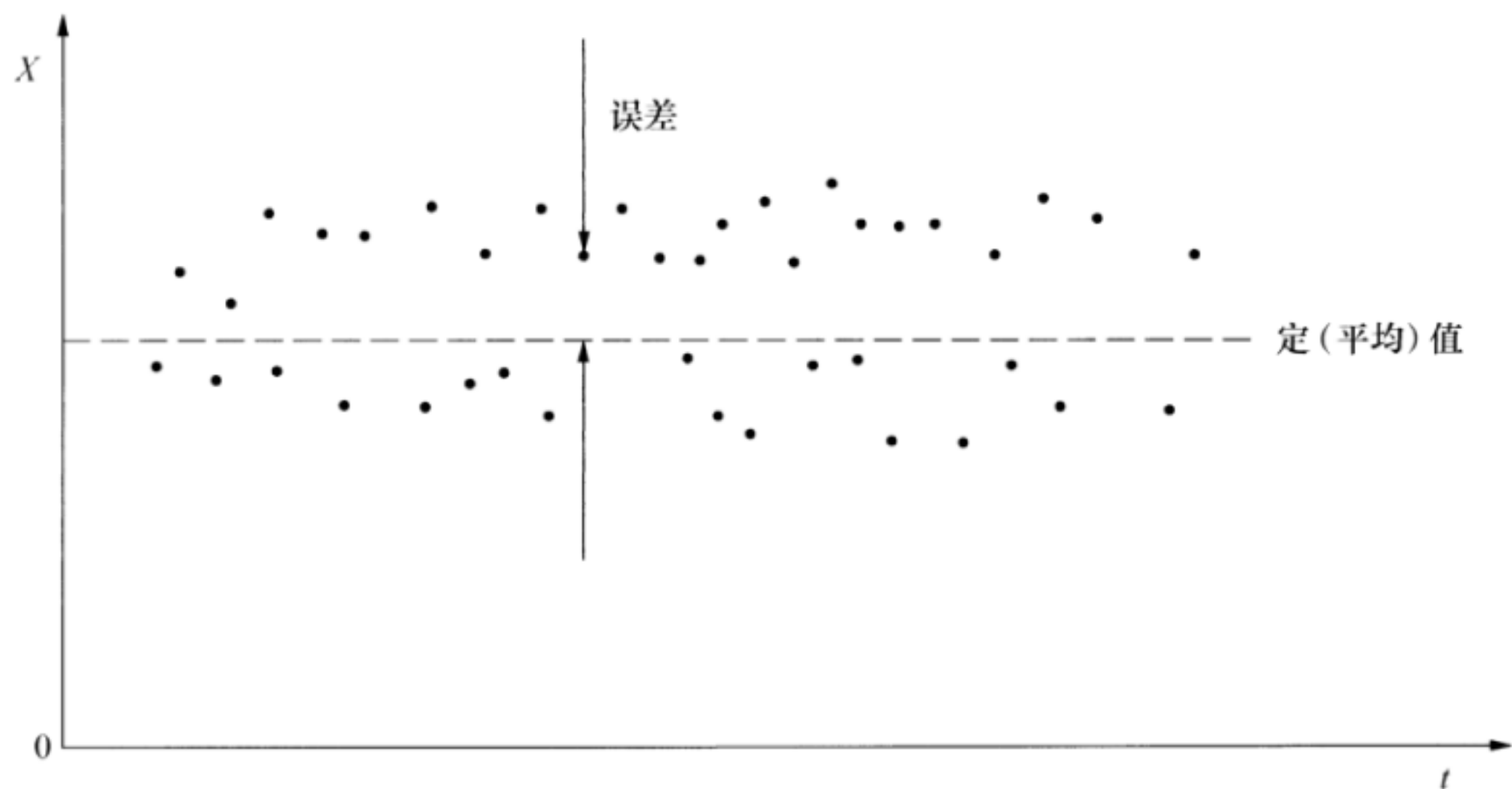


图 4 定值模型

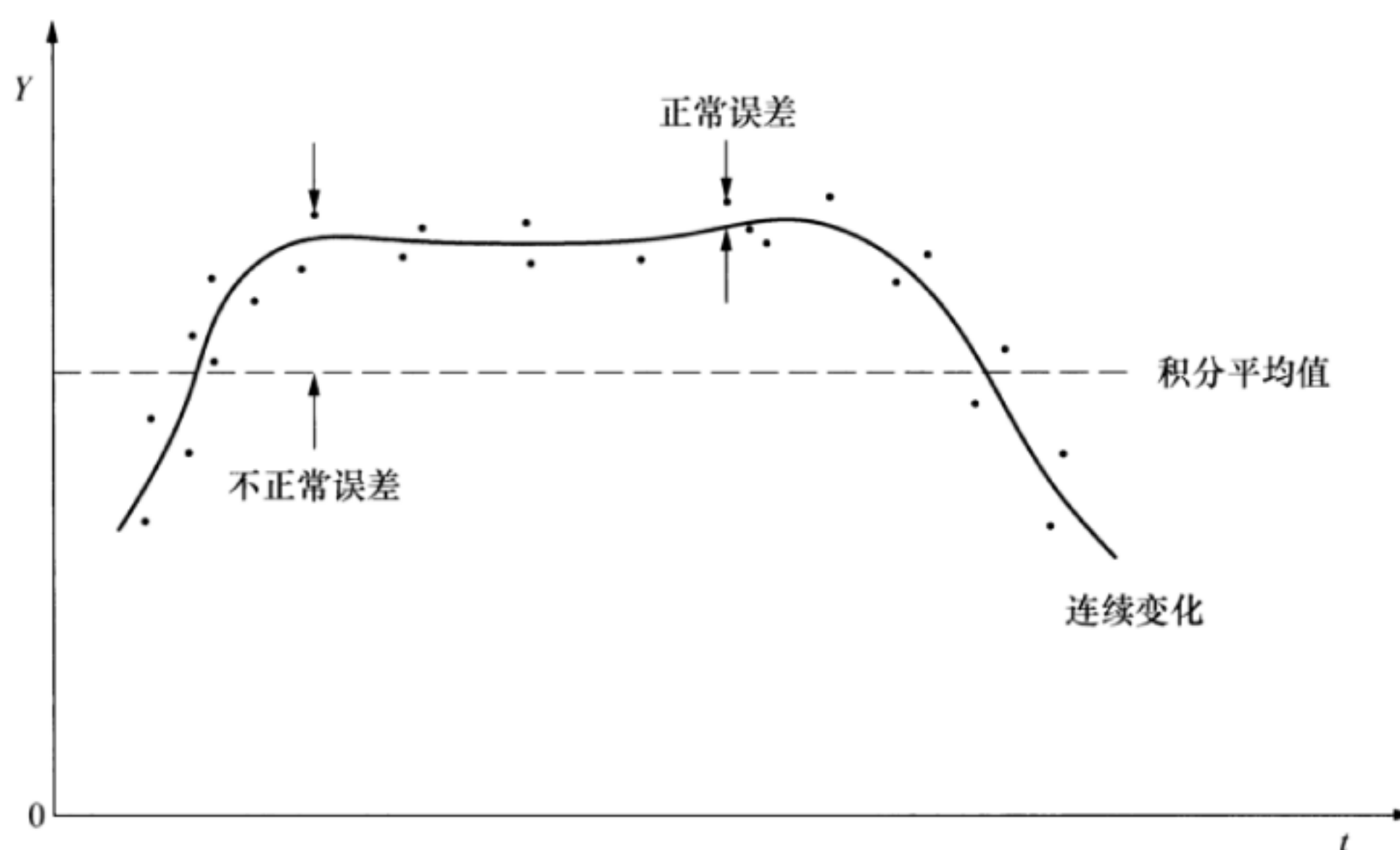


图5 连续变量模型

8.1.2.3 定值模型的算术平均值按式(52)计算,算术平均值的总体偏差按式(53)计算:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad \dots\dots\dots (52)$$

$$s(\bar{x}) = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N(N-1)} \right]^{1/2} \quad \dots\dots\dots (53)$$

8.1.2.4 连续变量模型的时间变化平均值按式(54)计算,空间变化平均值按式(55)计算:

$$\bar{y} = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} y dt \quad \dots\dots\dots (54)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{A} \int_0^A y dt \quad \dots\dots\dots (55)$$

8.1.2.5 本标准将数值积分作为系统效应引起的不确定度,属于B类评定。

8.2 不确定度计算及其传递计算方法

8.2.1 A类标准不确定度评定方法概述

“独立性”和“自由度”是A类评定的两个重要概念,在涉及相关参数时需要特别谨慎。当参数为相关性时,在灵敏系数中应考虑该相关性。本标准尽可能消除参数的相关性,例如,应利用燃料组分百分数间的封闭关系,来消除一次测量及其误差,因此通常不需要考虑相关误差。锅炉热工性能试验中,置信因子取2可以用作绝大多数情况的 t 分布。

8.2.2 B类标准不确定度评定方法概述

系统误差在测量系统和/或数据处理以及结果计算过程中不能由数据分析得出。系统误差是固定的,不是随机变量。系统误差是指在仪表标定后仍然存在的固定误差。多数情况下,应估计系统不确定度的数值。系统不确定度估计的推荐方法是估计具有95%置信度的数值。有时在性能试验中需要采用基于估计值而不是实际测量值的“数据”。同样,有时给某一参数赋予合理的数值

要比测量该参数更经济有效。本标准中，估计参数的不确定度用 B 类方法评定。

8.2.3 标准不确定度传递

因为 A 类评定和 B 类评定方法不同，所以，分别计算各自的传递，然后在不确定度计算的最后一步合并起来。假设某一个结果的计算式为式（56）：

$$R = f(x_1, x_2, \dots, x_M) \quad \dots\dots\dots (56)$$

式中：

$x_1 \sim x_M$ ——独立的被测量。

每个 x 都具有随机效应和系统效应引起的测量不确定度，可以使用 A 类标准不确定度和 B 类标准不确定度进行评定。对每一类型的不确定度，其基本传递方程为式（57）：

$$e_R = \left[\left(\frac{\partial f}{\partial x_1} e_{x_1} \right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2} e_{x_2} \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_M} e_{x_M} \right)^2 \right]^{1/2} \quad \dots\dots\dots (57)$$

式中：

e ——随机效应和系统效应引起的测量不确定度；

M ——独立被测量的数目。

传递方程可写为无因次形式，见式（58）：

$$\frac{e_R}{R} = \left\{ \sum_{i=1}^M \left[\left(\frac{x_i}{R} \frac{\partial f}{\partial x_i} \right) \frac{e_{x_i}}{x_i} \right]^2 \right\} \quad \dots\dots\dots (58)$$

式中：

e_{x_i} —— x_i 的不确定度；

$\left(\frac{x_i}{R} \frac{\partial f}{\partial x_i} \right)$ ——相对灵敏系数。

因为计算过程复杂，这些导数常用数值扰动法来估计，即式（59）：

$$\frac{\partial f}{\partial x_i} = \frac{f(x_1, \dots, x_i + \delta x_i, \dots, x_M) - f(x_1, \dots, x_i, \dots, x_M)}{\delta x_i} \quad \dots\dots\dots (59)$$

每次一个参数，依次将每个参数（ x_i ）改变一个小量（ δx_i ，一般是 0.1%~1%），用扰动参数代替标称值，所有其他参数维持不变，重新进行计算。用扰动计算的结果值与标称值计算的结果间的差值除以扰动量来估计偏导数。每一独立参数计算一次。

8.2.4 合成标准不确定度

结果的不确定度是标准不确定度 A 类评定和标准不确定度 B 类评定的均方根值乘以一个 t 分布的近似值，按式（60）计算：

$$U = k[(u_A(\bar{R}))^2 + (u_B(\bar{R}))^2]^{1/2} \quad \dots\dots\dots (60)$$

式中：

U ——扩展不确定度；

k ——包含因子；

$u_A(\bar{R})$ ——被测量估计值 \bar{R} 的 A 类标准不确定度；

$u_B(\bar{R})$ ——被测量估计值 \bar{R} 的 B 类标准不确定度。

结果的自由度通常足够大， t 分布 95% 置信度的不确定区间对应的包含因子 k 可以取为 2。

8.3 试验前的不确定度分析

8.3.1 试验前的不确定度分析对试验计划的帮助极大。试验各方可利用试验前的不确定度分析来帮助达到冷凝燃气锅炉热效率试验所列协议项目中的各种目的。仪表的数量和类型、记录次数、网格取样点数以及燃料样品数目等均能根据它们对试验结果不确定度的预计影响程度来决定。

8.3.2 试验前的不确定度分析方法在形式上与试验后的不确定度分析方法是相同的，不同点在于由于没有实际的试验数据，应估计基本的标准偏差，而不是由试验统计数据计算。

8.4 标准不确定度的 A 类评定

8.4.1 单个参数的标准偏差

8.4.1.1 单个参数的标准偏差取决于参数类型、积分平均值或定值以及测量该参数的方法。常用方法如下：

- a) 在单一点随时间进程进行多次测量（如主蒸汽压力、给水温度等）；
- b) 在给定平面上若干点进行多次测量（如烟气温度的、烟气成分等）；
- c) 称重箱或容器的多组测量，以确定平均流量（如小容量锅炉测量给水量）；
- d) 单一测量；
- e) 单一测量值之和。

8.4.1.2 在单一点随时间进程对某一参数进行多次测量时，实验标准偏差可按贝塞尔公式（61）计算：

$$s(x_k) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N-1}} \quad \dots\dots\dots (61)$$

式中：

被测量估计值 \bar{x} 的 A 类标准不确定度（平均值的实验标准偏差）按式（62）计算：

$$u_A(\bar{x}) = s(\bar{x}) = s(x_k) / \sqrt{N} \quad \dots\dots\dots (62)$$

式中：

$u_A(\bar{x})$ ——被测量估计值 \bar{x} 的 A 类标准不确定度。

自由度按式（63）计算：

$$v = N - 1 \quad \dots\dots\dots (63)$$

8.4.1.3 积分平均参数（非加权平均值），例如烟气温度和氧量，在网格中每一点随时间进程进行多次测量。随时间进程的每一点测量值取平均，以确定在该点的参数值，即按式（64）计算：

$$\bar{x}_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (x_j)_i \quad \dots\dots\dots (64)$$

式中：

i ——网格中的点；

N ——时间进程中读数的次数。

实验标准偏差、平均值的实验标准偏差以及自由度是在每一网格点计算的，也就是把该参数视为定值。积分平均参数的标准偏差按式（65）计算：

$$u_A(\bar{x}) = s(\bar{x}) = \frac{1}{m} \left\{ \sum_{i=1}^m [s(\bar{x}_i)]^2 \right\}^{1/2} \quad \dots\dots\dots (65)$$

式中：

m ——网格点数；

$s(\bar{x}_i)$ ——点 i 处参数的算术平均值标准偏差，按式 (62) 计算。

相关的自由度按式 (66) 计算：

$$v = \frac{[s(\bar{x})]^4}{\sum_{i=1}^m \frac{[s(\bar{x}_i)]^4}{m^4 v_i}} \quad \dots\dots\dots (66)$$

式中：

v_i —— $s(\bar{x}_i)$ 的自由度，即在点 i 处读数的次数减 1。

8.4.1.4 多子样制备样本测量的标准偏差和自由度规定如下：

- a) 单独分析的子样。如果每一子样能够良好地混合、缩样并分割，则某一组分的平均值就是分析测量的平均值。平均值的实验标准偏差和自由度由式 (62) 和式 (63) 确定；
- b) 分析前混合的子样。如果子样在分析前混合，则各种各样的子样被机械平均了（例如，在分析前将若干烟气取样管的样本送入混合室或气囊“混合”起来），平均值的实验标准偏差和自由度由式 (65) 和式 (66) 确定。

8.4.2 中间结果的标准偏差和自由度

在锅炉热工性能试验过程中，某些测量项目由若干检测数据计算得到，如焓值，通常由温度测量值计算得到。有两种方法计算标准偏差，一种是用误差传递公式 (57)，并结合中间结果与检测参数间的关联式；另一种是在求取平均值前将数据先转换成中间结果，然后计算结果的标准偏差。以下为几种特定情况的计算方法：

- a) 形如 $z = C\sqrt{x}$ 的参数。首先将测量值 x_i 转换成 z_i ，然后，由 z_i 计算 z 的平均值和实验标准偏差。例如，差压式流量计；
- b) 形如 $z = a_0 + a_1\bar{x} + a_2\bar{x}^2 + \dots + a_n\bar{x}^n$ 的参数。求样本平均值标准偏差的公式 (53) 可以应用于只有一个变量的函数，如 $z = a_0 + a_1\bar{x} + a_2\bar{x}^2 + \dots + a_n\bar{x}^n$ ，变量为 \bar{x} ，则 \bar{x} 的灵敏系数按式 (67) 计算，锅炉热工性能试验中的温焓关系是式 (67) 的一种：

$$c_x = \frac{\partial z}{\partial x} = a_1 + 2a_2\bar{x} + \dots + na_n\bar{x}^{n-1} \quad \dots\dots\dots (67)$$

其平均值的实验标准偏差按式 (68) 计算：

$$s(\bar{z}) = \sqrt{[c_x \cdot s(\bar{x})]^2} \quad \dots\dots\dots (68)$$

- c) 形如 $z = C\bar{u}\bar{v}$ 的参数。灵敏系数按式 (69) 和式 (70) 计算：

$$c_u = C\bar{v} \quad \dots\dots\dots (69)$$

$$c_v = C\bar{u} \quad \dots\dots\dots (70)$$

其平均值的实验标准偏差按式 (71) 计算：

$$s(\bar{z}) = [(C\bar{v}s_{\bar{u}})^2 + (C\bar{u}s_{\bar{v}})^2]^{1/2} \quad \dots\dots\dots (71)$$

其自由度按式 (72) 计算:

$$v = \frac{\left[\frac{s(\bar{z})}{C} \right]^4}{\bar{v}^4 \frac{s_u^4}{v_u} + \bar{u}^4 \frac{s_v^4}{v_v}} \quad \dots\dots\dots (72)$$

d) 对于使用累积法测试流量的, 一般标准偏差可以忽略。

8.4.3 试验结果的实验标准偏差和自由度

8.4.3.1 如果试验结果是某一测量参数, 例如锅炉排烟温度, 则结果的标准偏差和自由度也就是参数本身的标准偏差和自由度值。如果试验结果必须由试验数据计算得到, 例如锅炉热效率, 则结果的标准偏差和自由度应由各个参数的对应值计算得到。

8.4.3.2 实验标准偏差的组合按式 (73) 计算:

$$u_A(\bar{R}) = s(\bar{x}) = \left\{ \sum_{i=1}^n [c_{x_i} \cdot s(\bar{x}_i)]^2 \right\}^{1/2} \quad \dots\dots\dots (73)$$

式中:

c_{x_i} ——被测量 R 与有关的输入量 X_i 之间的函数对于输入量的估计值 x_i 的偏导数, 称为灵敏系

数, $c_{x_i} = \frac{\partial R}{\partial x_i}$;

n ——用来计算 R 的参数总数。

8.4.3.3 自由度组合按式 (74) 计算:

$$v_{s(\bar{x})} = \frac{[s(\bar{x})]^4}{\sum_{i=1}^k \frac{[c_{x_i} \cdot s(\bar{x}_i)]^4}{v_{x_i}}} \quad \dots\dots\dots (74)$$

8.4.3.4 一般在测量次数较少时, 可采用极差法评定获得实验标准偏差。在重复性条件或复现性条件下, 对 X_i 进行 n 次独立重复观测, 测得值中的最大值与最小值之差称为极差, 用符号 R_a 表示。在 X_i 可以接近正态分布的前提下, 单个测得值 x_k 的实验标准差 $s(x_k)$ 按式 (75) 进行评定。例如, 锅炉性能试验中的蒸汽湿度测量。

$$s(x_k) = \frac{R_a}{C_a} \quad \dots\dots\dots (75)$$

式中:

R_a ——极差;

C_a ——极差系数。

极差系数 C_a 及自由度 v 可查表 11 得到。

表 11 极差系数 C_a 及自由度 v

n	2	3	4	5	6	7	8	9
C_a	1.13	1.69	2.06	2.33	2.53	2.70	2.85	2.97
v	0.9	1.8	2.7	3.6	4.5	5.3	6.0	6.8

被测量估计值的标准不确定度按式 (76) 计算:

$$u_A(\bar{x}) = s(\bar{x}) = s(x_k) / \sqrt{n} = \frac{R_a}{C_a \sqrt{n}} \dots\dots\dots (76)$$

8.4.3.5 对锅炉热效率，本标准推荐使用扰动法近似计算灵敏系数，每次使一个参数变化一微小量 δx_i ，其他参数保持不变，评估试验结果计算值的变化量 δR 。灵敏系数按式（77）计算：

$$c_{x_i} = \frac{\partial R}{\partial x_i} \approx \frac{\delta R}{\delta x_i} \dots\dots\dots (77)$$

式中：
 δx_i ——某一微小量，例如， $x_i/100$ 或 $x_i/1\,000$ 。

8.5 标准不确定度的 B 类评定

8.5.1 仪表的 B 类标准不确定度

8.5.1.1 B 类标准不确定度 u_B 由式（78）计算：

$$u_B = \frac{a}{k} \dots\dots\dots (78)$$

式中：
 a ——被测量可能值区间的半宽度；
 k ——根据概率论获得的 k 称置信因子，当 k 为扩展不确定度的倍乘因子时称为包含因子。

8.5.1.2 区间半宽 a 见 JJF 1059.1 的相关规定，部分确定方法举例如下：

- a) 生产厂提供的测量仪器的最大允许误差为 $\pm\Delta$ ，并经计量部门检定合格，则评定仪器的不确定度时，可能值区间的半宽度为 $a = \Delta$ ；
- b) 校准证书提供的校准值，给出了其扩展不确定度为 U ，则区间的半宽度为 $a = U$ ；
- c) 由手册查出所用的参考数据，其误差限为 $\pm\Delta$ ，则区间的半宽度为 $a = \Delta$ ；
- d) 由有关资料查得某参数的最小可能值为 a_- 和最大可能值为 a_+ ，最佳估计值为该区间的中点，则区间半宽度可估计为 $a = (a_+ - a_-)/2$ ；
- e) 当测量仪器或实物量具给出准确度等级时，可以按检定规程规定的该等级的最大允许误差得到对应区间的半宽度；
- f) 必要时，可根据经验推断某量值不会超出的范围，或用实验方法来估计可能的区间。

8.5.1.3 假设为正态分布时，根据要求的概率查表 12 得到 k 。假设非正态分布时，不同分布类别的置信因子 k 及 B 类标准不确定度 $u_B(x)$ 查表 13 得到。

表 12 正态分布情况下概率 p 与包含因子 k 间的关系

p	0.50	0.68	0.90	0.95	0.954 5	0.99	0.997 3
k	0.675	1	1.645	1.960	2	2.576	3

表 13 常用非正态分布的包含因子 k 及 B 类标准不确定度 $u_B(x)$

分 布 类 别	$p/\%$	k	$u_B(x)$
三角形	100	$\sqrt{6}$	$a/\sqrt{6}$
梯形（ $\beta = 0.71$ ）	100	2	$a/2$
矩形（均匀）	100	$\sqrt{3}$	$a/\sqrt{3}$
反正弦	100	$\sqrt{2}$	$a/\sqrt{2}$
两点	100	1	a

8.5.1.4 如果有证书或报告给出的不确定度是具有包含概率为 0.95、0.99 的扩展不确定度，可按正态分布来评定。其他的概率分布按 JJF 1059.1 的规定进行评定。

8.5.1.5 如果仪表系统的每一部分均有各自的 B 类标准不确定度，则测量的组合 B 类标准不确定度按式 (79) 计算：

$$u_B = (u_{B_1}^2 + u_{B_2}^2 + \cdots + u_{B_m}^2)^{1/2} \quad \text{..... (79)}$$

式中：

m ——系统的各个组成部分。

8.5.1.6 在某一点用一台仪器进行多次测量时，例如，用相同的热电偶在烟道横截面上若干点测量温度，参数平均值的 B 类标准不确定度为单次测量的仪表 B 类标准不确定度，按式 (80) 计算：

$$u_{\bar{x}} = u_{B_{xi}} \quad \text{..... (80)}$$

式中：

$u_{\bar{x}}$ ——平均参数的 B 类标准不确定度；

$u_{B_{xi}}$ ——仪表回路 i 的 B 类标准不确定度。

8.5.1.7 在若干位置用多台仪表进行多次测量时，例如，用固定热电偶网格点测量平均烟气温度，所有仪表回路均具有相同的 B 类标准不确定度，例如，每一热电偶加补偿导线、数据装置等组成的回路 B 类标准不确定度相同。平均参数的 B 类标准不确定度等于任一回路的仪表 B 类标准不确定度，可以用式 (80) 描述。仪表不同回路中具有不同的 B 类标准不确定度。平均参数的仪表 B 类标准不确定度等于所有回路的仪表 B 类标准不确定度的平均值，按式 (81) 计算：

$$u_{\bar{x}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_{B_{xi}} \quad \text{..... (81)}$$

式中：

N ——不同仪表回路的个数。

8.5.2 空间不均匀参数不确定度的 B 类评定

8.5.2.1 一般要求

锅炉性能试验的某些参数，即锅炉系统边界面上的烟气温度、空气温度以及烟气成分，均应采用流量加权积分求取平均值。实际试验中，积分平均值由在有限个点取样来近似得到，并采用数值近似法求得积分。每一项近似均引入不确定度，本标准将这些不确定度加到仪表不确定度上。

8.5.2.2 数值积分产生的不确定度的 B 类评定

在单股物流，例如烟气，分叉为两个或更多管道的情况下，该模型分别应用于每一管道，按式 (82) 计算：

$$u_{B_n} = \frac{1}{2} \left(\frac{\sum_{i=1}^m (z_i - \bar{z})^2}{m(m-1)} \right)^{1/2} \quad \text{..... (82)}$$

式中：

u_{B_n} ——单股物流分叉形成的每一管道数值积分产生的 B 类标准不确定度；

m ——测量网格中的测点数；

n ——管道数；

z_i ——连续分布参数的时间平均值（温度、氧量等）；

\bar{z} —— z_i 的综合平均值。

8.5.2.3 未采用流量测试加权的流量加权不确定度的 B 类评定

不确定度估计值为加权与未加权平均值之差的估计值。在没有可靠流速数据的条件下，温度不确定度估计按式（83）计算：

$$\bar{t}_{\text{FW}} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{T_i}{T} t_i \quad \dots\dots\dots (83)$$

式中：

m ——测量网格中跨横截面测量的点数；

T_i ——某一测量点的绝对温度 [$T_i = t_i(^{\circ}\text{C}) + 273.15$]，K；

T ——测量点绝对温度的算数平均值，绝对温度 [$T = t(^{\circ}\text{C}) + 273.15$]，K。

温度的标准不确定度的 B 类评定按式（84）计算：

$$u_{B_{\text{LFW}}} = \bar{t}_{\text{UW}} - \bar{t}_{\text{FW}} \quad \dots\dots\dots (84)$$

氧浓度的标准不确定度按式（85）计算：

$$\frac{u_{B_{\varphi_{\text{O}_2, \text{FW}}}}}{\varphi_{\text{O}_2}} = \frac{u_{B_{\text{LFW}}}}{\bar{t}_{\text{FW}}} \quad \dots\dots\dots (85)$$

式中：

φ_{O_2} ——氧浓度的平均值，%。

8.5.3 仪表和方法的 B 类标准不确定度的组合评定

仪表和方法的 B 类标准不确定度的组合评定按式（86）进行：

$$u_{\text{B}} = (u_{B_1}^2 + u_{B_n}^2 + u_{B_{\text{LFW}}}^2)^{1/2} \quad \dots\dots\dots (86)$$

式中：

u_{B_1} ——仪表的 B 类标准不确定度。

8.5.4 对未测量参数假设值的 B 类标准不确定度评定

某假设参数的合理“上下限”值间的中点通常取作性能计算中该参数的值。“上下限”值之差值的一半作为不确定度分析中的 B 类标准不确定度。

8.5.5 B 类标准不确定度的自由度

B 类标准不确定度的自由度按式（87）近似计算，详细描述见 JJF 1059.1。一般情况下，B 类评定的标准不确定度可以不给出其自由度。

$$v_i \approx \frac{1}{2} \left[\frac{\Delta[u(x_i)]}{u(x_i)} \right]^{-2} \quad \dots\dots\dots (87)$$

式中：

$\frac{\Delta[u(x_i)]}{u(x_i)}$ —— $u(x_i)$ 的相对标准不确定度。

8.5.6 试验结果的标准不确定度 B 类评定

由测量参数值和假设参数值计算的某一结果的整体系统不确定度可用式 (88) 确定, 该公式假设导致测量不确定度的各分量 $u_B(x_i)$ 相互间不相关。

$$u_B(R) = \left\{ \sum_{i=1}^k [c_{x_i} \cdot u_B(x_i)]^2 \right\}^{1/2} \quad \dots\dots\dots (88)$$

式中, $u_B(R)$ 的自由度按式 (89) 确定:

$$v_{u_B(R)} = \frac{[u_B(R)]^4}{\sum_{i=1}^k \frac{[c_{x_i} \cdot u_B(x_i)]^4}{v_{u_B(x_i)}}} \quad \dots\dots\dots (89)$$

8.6 合成标准不确定度的计算

某一试验结果的 A 类标准不确定度和 B 类标准不确定度按式 (90) 组合为试验的标准不确定度, 例如锅炉热效率标准不确定度的计算。

$$u_c(R) = \{[u_B(R)]^2 + [u_A(R)]^2\}^{1/2} \quad \dots\dots\dots (90)$$

式中, 试验结果 $u_c(R)$ 的自由度由式 (91) 计算得到:

$$v_{u_c(R)} = \frac{\{[u_B(R)]^2 + [u_A(R)]^2\}^2}{\frac{[u_A(R)]^4}{v_{u_A(R)}} + \frac{[u_B(R)]^4}{v_{u_B(R)}}} \quad \dots\dots\dots (91)$$

8.7 扩展不确定度的确定

扩展不确定度 U 由合成标准不确定度 $u_c(R)$ 乘包含因子 k 得到, 按式 (92) 计算:

$$U = k \cdot u_c(R) \quad \dots\dots\dots (92)$$

在通常测量中, 一般取 $k=2$ 。当 k 取其他值时, 应说明其来源。当给出扩展不确定度 U 时, 一般应注明所取的 k 值; 若未注明 k 值, 则 $k=2$ 。

9 试验报告

9.1 基本要求

性能试验结果报告的文件包括试验数据、计算和实施性能试验的过程。报告要列出规定的数据和资料以证明已达到所有的试验目标, 并且描述试验手段和有关的结果。

9.2 报告内容

9.2.1 试验背景

包括试验的性质 (验收试验、定型试验或一般性能试验)、试验委托单位、试验负责单位、试验参加单位、试验总体时间等。

9.2.2 试验目的

对于定型试验或验收试验, 试验目的重在检验锅炉运行性能能否达到设计要求或设备合同中有关技术保证值, 其他试验的目的根据试验双方的约定。

9.2.3 试验内容

包括试验项目、项目保证值及保证条件等。

9.2.4 测试项目、仪器设备、测点布置与测试方法

包括根据试验内容确定的测试项目，使用的仪器设备的名称、量程、编号和精度，燃料化验的实验室，测点位置、测点数量、必要的测点安装图，取样测试方法及取样测试频率等。

9.2.5 试验数据整理

包括记录的锅炉运行参数、燃料的分析化验资料、测试结果和计算结果。

9.2.6 试验结果

应根据试验结果结合试验内容逐一进行比较和分析，并对测试过程中遇到的问题加以说明。

9.2.7 不确定度分析

定型、验收或用户要求的应详细描述目标的不确定度，并说明该项试验是否达到此目标。

9.2.8 结论和建议

根据试验结果对锅炉设备作出最终评价；对定型试验按照相关技术规范进行判定。

9.2.9 测试情况说明

包括锅炉设备的设计技术特性、锅炉主要辅机技术特性、锅炉系统的污染物控制技术、燃料特性以及运行情况及必要的图表。

9.2.10 附件

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

附录 A

(规范性附录)

网格法等面积的划分原则及代表点的确定

A.1 圆形截面

将圆形截面划分为 N 个等面积的同心圆环，再将每个圆环分成相等面积的两部分。测点位于分成的两个同心圆环的分界线上，见图 A.1。

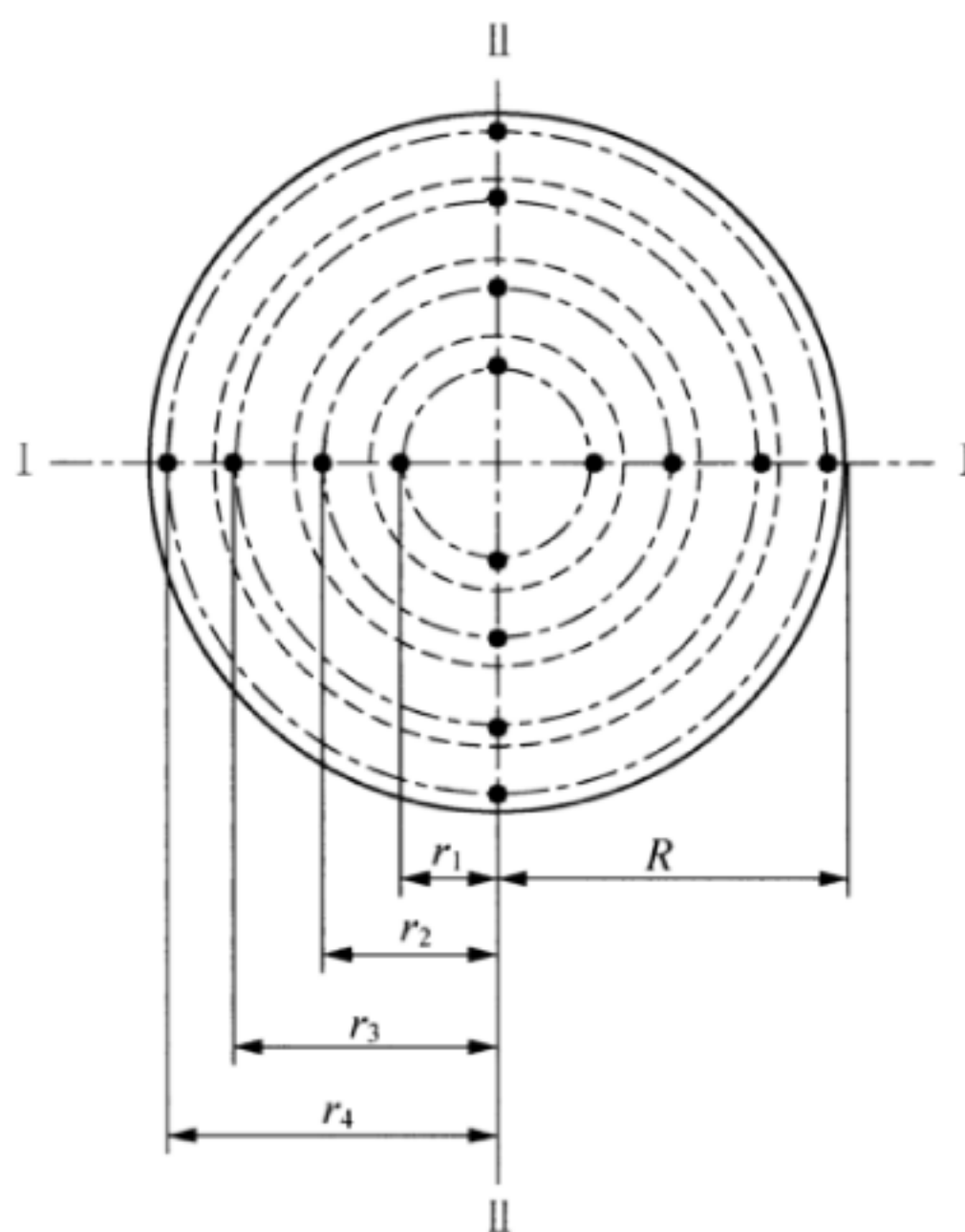


图 A.1 圆形截面测点分布示意图

测点距圆形截面中心的位置按式 (A.1) 计算：

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

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。

当截面直径不超过 400mm 时，可在一条直径上测量；若直径大于 400mm，应在相互垂直的两条直径上测量。

圆形截面直径 D 与划分圆环数 N 的规定见表 A.1。

表 A.1 圆形截面直径 D 与划分圆环数 N 的规定

项 目	管道直径 D/mm			
	≤ 300	$> 300 \sim 400$	$> 400 \sim 600$	$D > 600$ 时, D 每增加 200
等面积圆环数 N	3	4	5	N 增加 1
测点总数	6	8	20	测点增加 4

A.2 矩形截面

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

矩形截面边长 L (或 B) 与测点排数 N 的规定见表 A.2。

应在相互垂直的横向和纵向上分别测量。

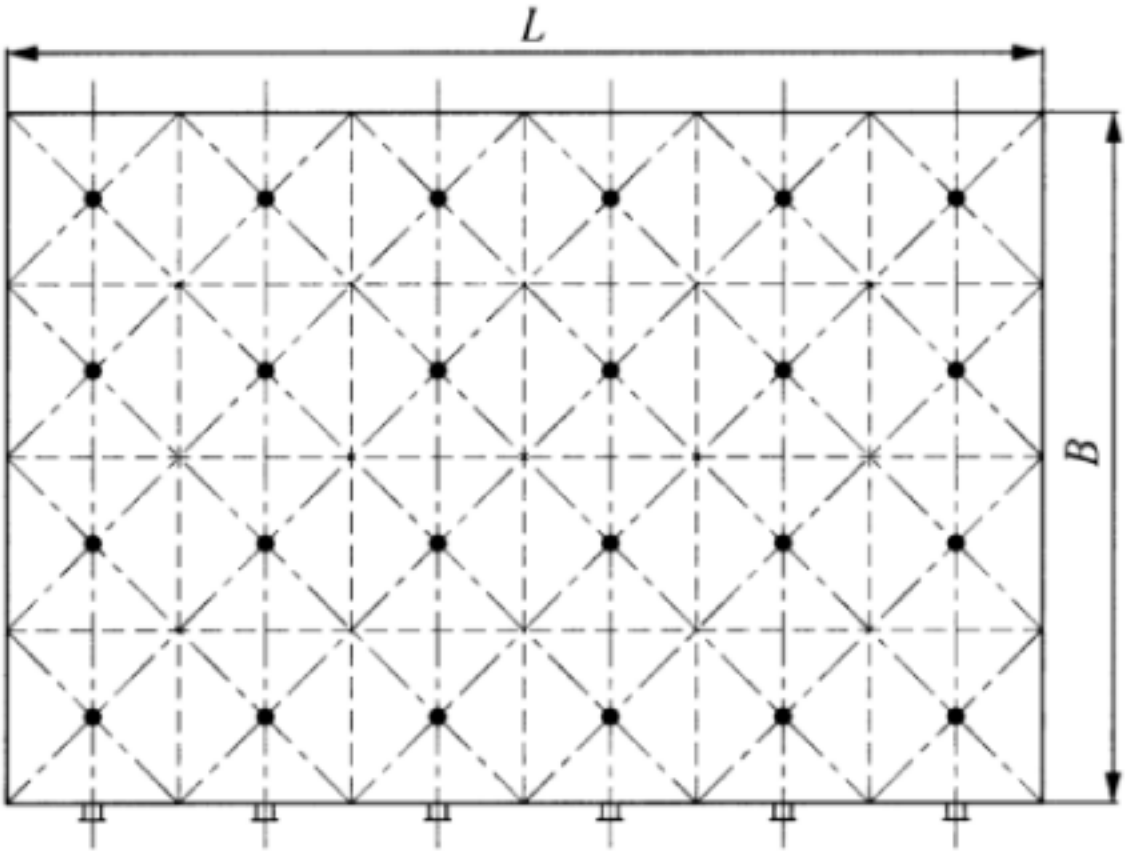


图 A.2 矩型截面测点分布示意图

表 A.2 矩形截面边长 L (或 B) 与测点排数 N 的规定

项 目	边长 L 或 B (按较长边长计) /mm			
	≤ 500	$500 \sim 1\,000$	$> 1\,000 \sim 1\,500$	$> 1\,500$
测点排数 N	3	4	5	L 每增长 500, 测点排数 N^a 增加 1
^a 对较大的矩形截面,可适当减小 N 值,但每个小矩形的边长应不超过 1m。				

附录 B

(规范性附录)

伴热原理测量冷凝烟气温度和湿度

B.1 温度、湿度测量原理图

由于液滴过冷度的存在，在烟道内携带冷凝液滴的气、液两相流场内将形成不均匀的温度场和湿度场。按热量平衡原理，同一截面上存在过冷温度点，就对应存在湿度不饱和点和未凝结烟气温度点。

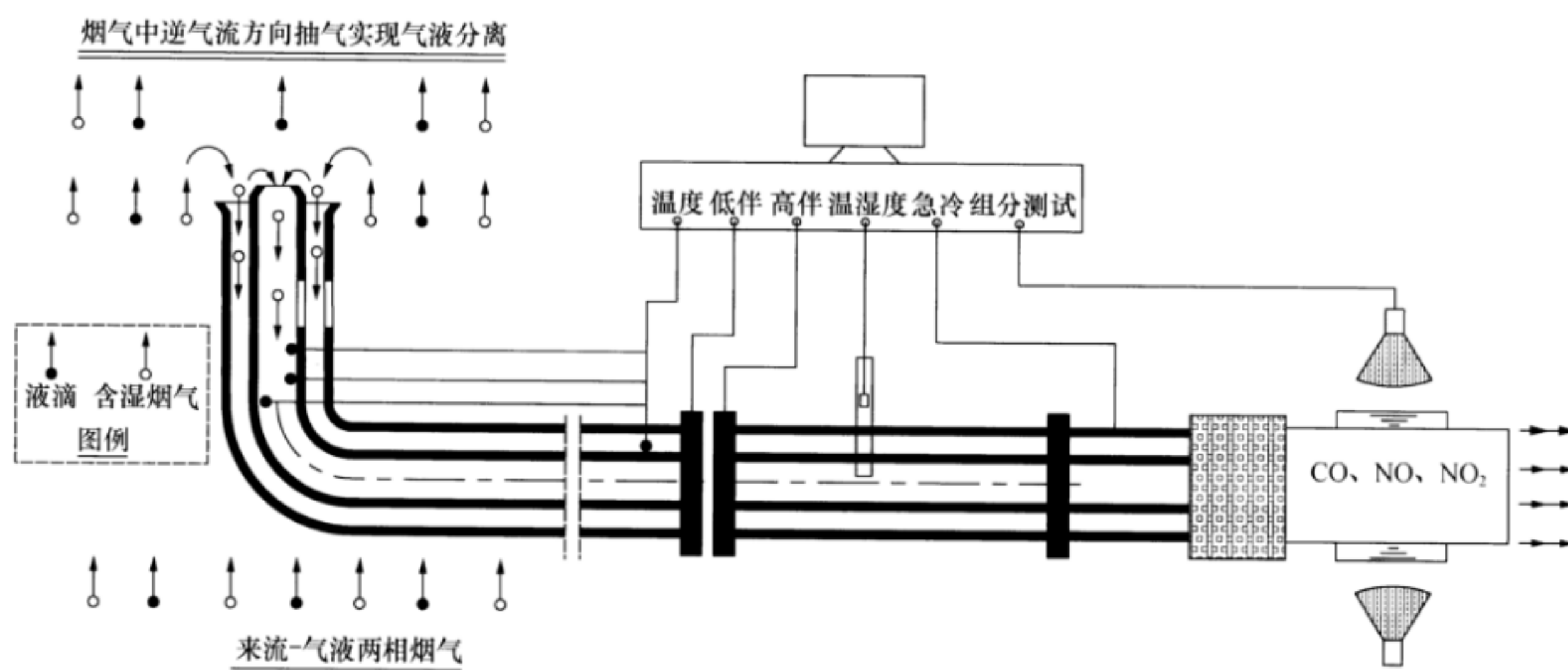


图 B.1 抽气式伴热原理图

采用逆向（与来流烟气方向相反）抽气装置，将湿烟气与冷凝液滴分离，在同点烟气伴热条件下，先测试湿烟气温度，而后将湿烟气加热，利用湿敏电容测试加热后的烟气温度、湿度，计算出烟气含湿量，从而获得最后一级冷凝受热面出口烟气中的水蒸气量。测温原理见图 B.1。

B.2 烟气发生冷凝后湿度测量方法

基于抽气式伴热原理，该伴热结构对抽取的烟气进行加热，避免了抽气过程中烟气中的水蒸气发生二次冷凝现象，测量方法见图 B.2。在伴热段测量点 2 处能够测得经伴热后烟气的温度和相对湿度，测得的烟气温度和相对湿度分别记为 t_2 和 $h_{RH,fg,2}$ ，由于在测试系统中伴热结构是对烟气进行等湿加热，在加热过程中烟气的含湿量不变，因此，通过测得的烟气温度 t_2 、烟气相对湿度 $h_{RH,fg,2}$ ，能够计算出绝对含湿量 $h_{ab,fg}$ ，根据含湿量不变原理，就能够计算出测量点 1 的水蒸气量。

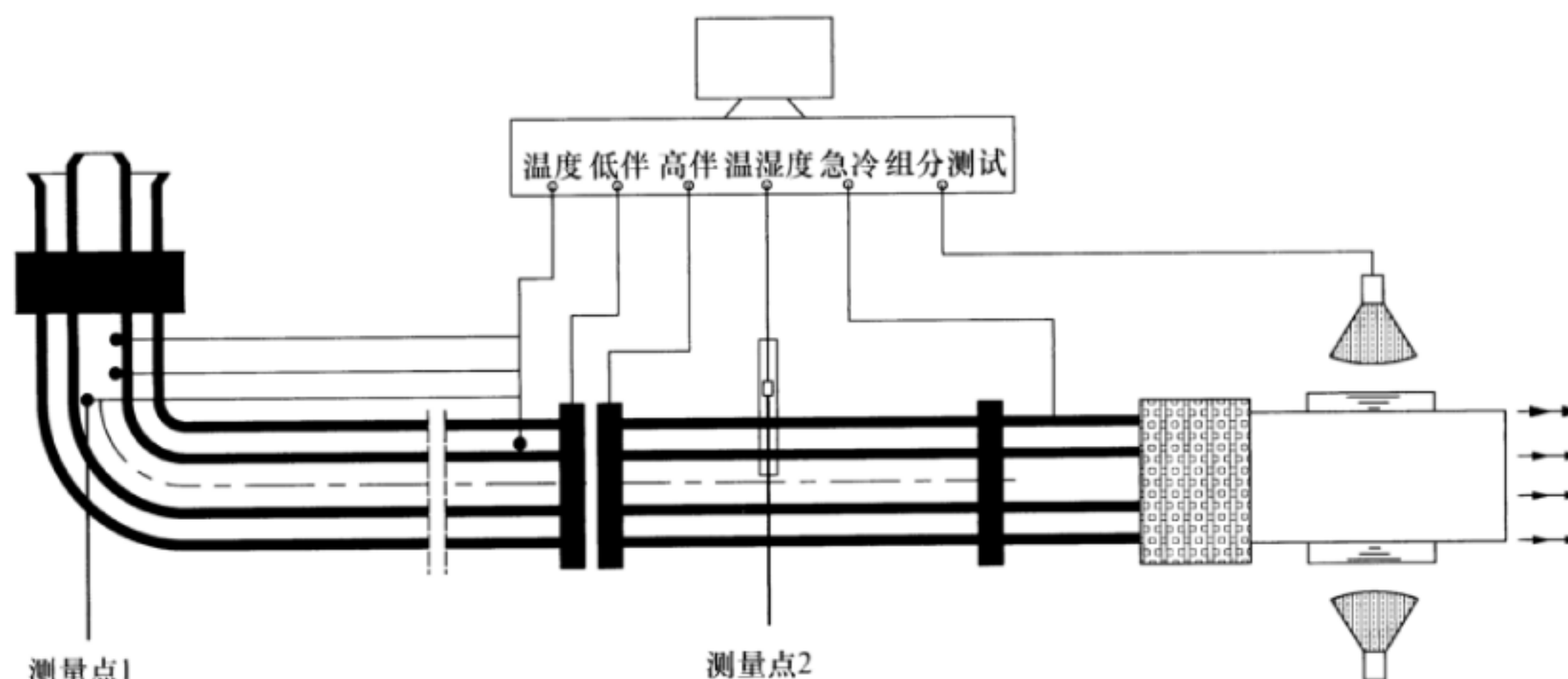


图 B.2 冷凝烟气温、湿度测量方法

B.3 含湿量计算方法

B.3.1 t_i 下的水蒸气饱和压力

本标准推荐使用 Goff-Gratch 公式 (B.1), 温度范围 $T > 273.15\text{K}$ 。

$$\ln p_{\text{st.Sat},t_i} = -7.902\,98 \left(\frac{373.16}{T} - 1 \right) + 5.028\,08 \lg \left(\frac{373.16}{T} \right) - 1.381\,6 \times 10^{-7} \left(10^{11.344 \left(1 - \frac{T}{373.16} \right)} - 1 \right) \\ + 8.132\,8 \times 10^{-3} \left(10^{-3.491\,49 \left(\frac{373.16}{T} - 1 \right)} - 1 \right) + \lg(1\,013.246) \quad \dots\dots (\text{B.1})$$

式中:

$p_{\text{st.Sat},t_i}$ ——在 t_i 温度下的水蒸气饱和压力, hPa;

T —— t_i 对应的绝对温度 [$T = t_i (\text{°C}) + 273.15$], K。

B.3.2 烟气含湿量

$$h_{\text{ab.fg.Cond.Lv}} = 0.622 \times \frac{\frac{h_{\text{RH.fg},i}}{100} \times 100 \times p_{\text{st.Sat},t_i}}{p_{\text{at}} - \frac{h_{\text{RH.fg},i}}{100} \times 100 \times p_{\text{st.Sat},t_i}} \quad \dots\dots (\text{B.2})$$

式中:

$h_{\text{ab.fg.Cond.Lv}}$ ——最后一级冷凝受热面出口的烟气含湿量, kg/kg;

$h_{\text{RH.fg},i}$ ——对应测量点 i 的相对湿度, 用伴热式湿度测量系统进行测量获得, %;

p_{at} ——当地大气压力, 实际测量, Pa。

附 录 C
(规范性附录)
饱和蒸汽湿度和过热蒸汽含盐量测定方法

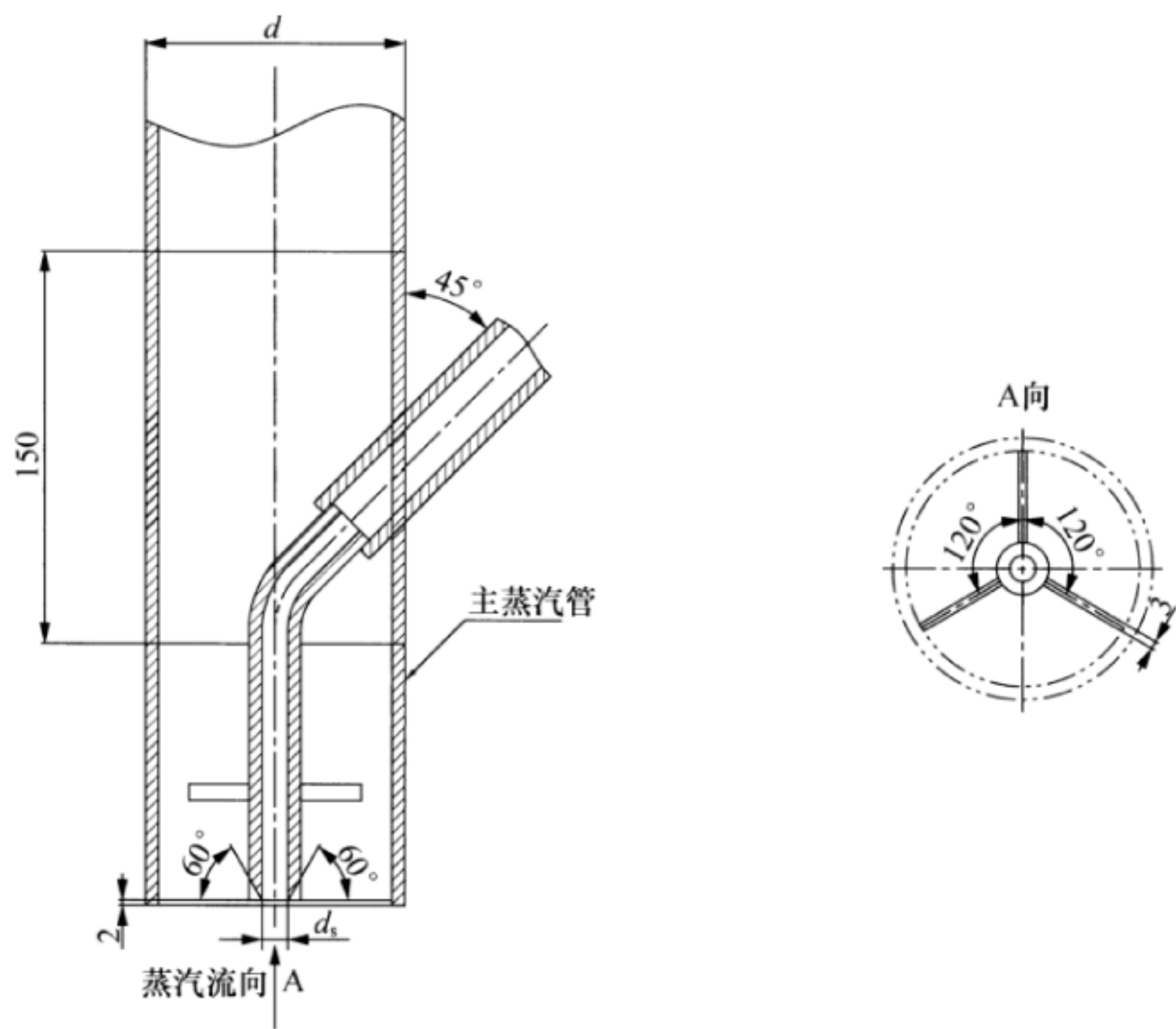
C.1 总则

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

C.2 蒸汽和锅水样的采集

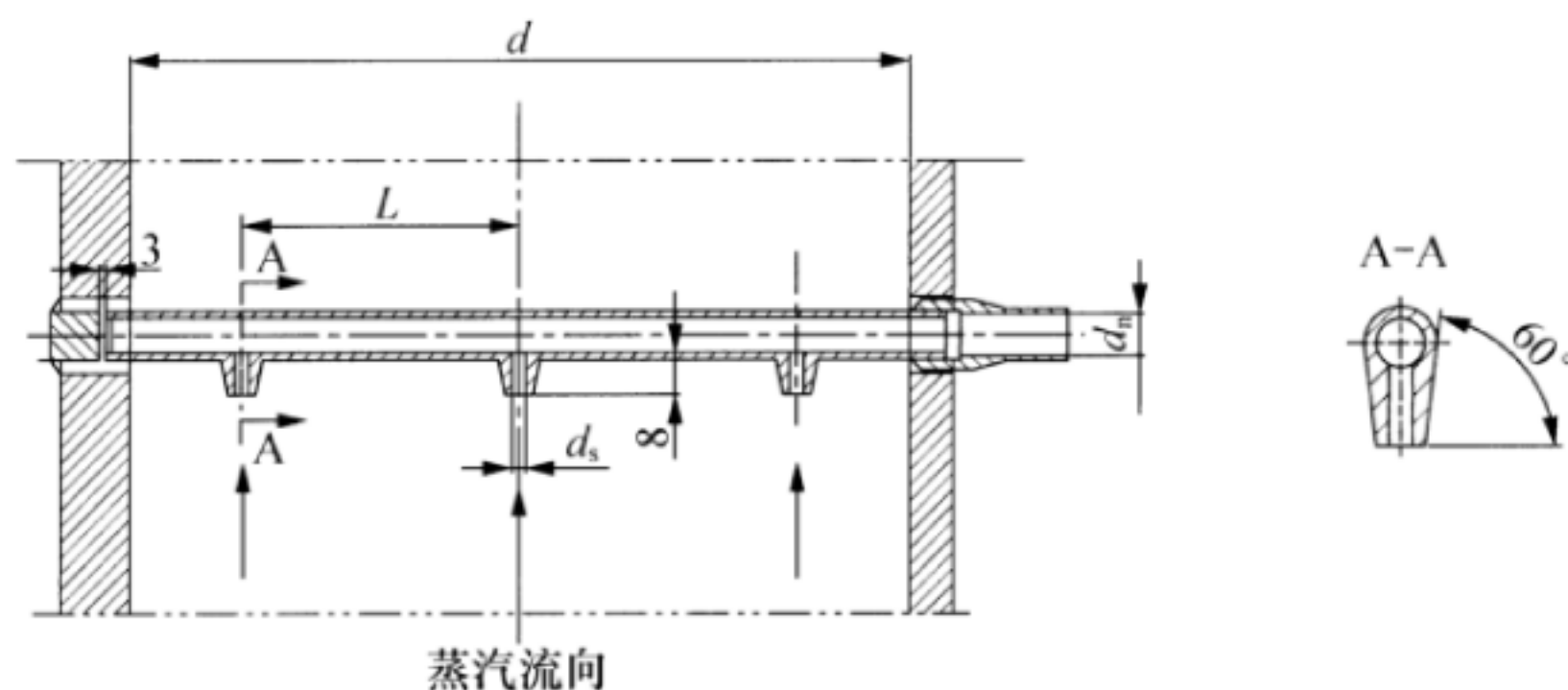
C.2.1 采样头

饱和蒸汽的取样头可采用图 C.1 所示结构，如饱和蒸汽引出管径大于 100mm 以上，也可采用图 C.2 所示结构；过热蒸汽取样头可采用图 C.2 所示结构。



注： d_s 一般为 10mm。

图 C.1 饱和蒸汽取样头



注：\$L \approx 0.433d\$；\$d_n=10\text{mm} \sim 15\text{mm}\$；\$d_s=3\text{mm} \sim 4\text{mm}\$。

图 C.2 过热蒸汽取样头

C.2.2 等速采样时蒸汽试样流量

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

对单孔取样：

$$Mr_{\text{Sat.Sa}} = \frac{d_{\text{Sat.Sa}}^2}{d^2} D_{\text{ev.Sat.O.M}} \quad \dots\dots\dots (\text{C.1})$$

式中：

$Mr_{\text{Sat.Sa}}$ ——蒸汽试样流量，kg/h；

$d_{\text{Sat.Sa}}$ ——蒸汽取样管孔内径，mm；

d ——蒸汽引出管内径，mm；

$D_{\text{ev.Sat.O.M}}$ ——实测饱和蒸汽锅炉输出蒸发量，kg/h。

对多孔取样：

$$Mr_{\text{Sat.Sa}} = n \frac{d_{\text{Sat.Sa}}^2}{d^2} D_{\text{ev.Sat.O.M}} \quad \dots\dots\dots (\text{C.2})$$

式中：

n ——取样孔数，个。

蒸汽取样应调节调节阀至计算的试样流量，其偏差值不宜超过±10%。

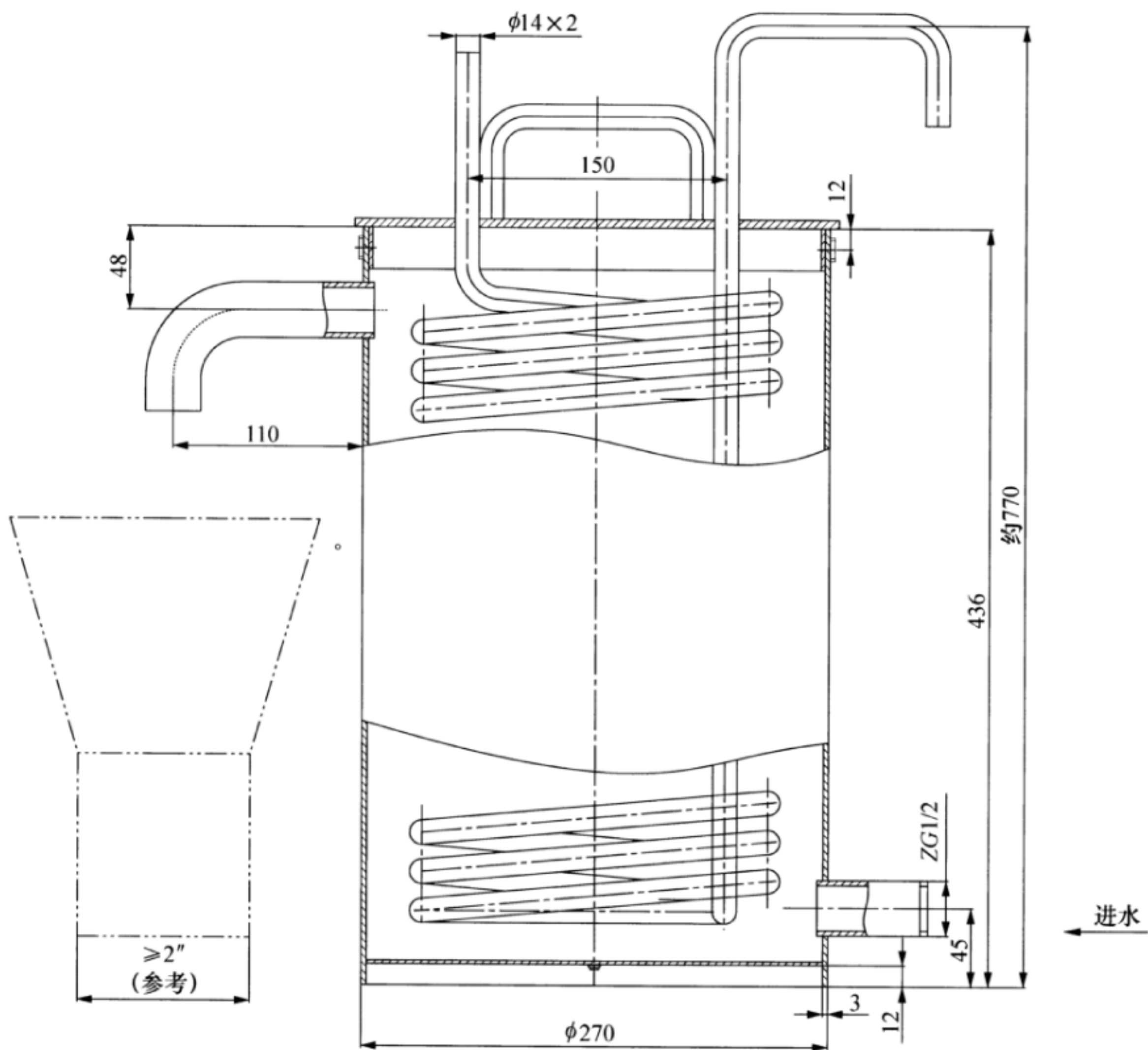
C.2.3 采样点及采样要求

C.2.3.1 锅水取样点应从具有代表锅水浓度的管道上引出。

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

C.2.3.3 盛取蒸汽凝结水样品的容器应是由塑料制成的瓶，盛取锅水样品的容器也可以用硬质玻璃瓶。取样前，应先将采样瓶彻底清洗干净，取样时用水样冲洗 3 次以后，按计算的试样流量取样，取样后应迅速盖上瓶塞。

C.2.3.4 在试验期间应定期同时对锅水和蒸汽进行取样和测定。



注：尺寸仅供参考。

图 C.3 采样冷却器

C.3 饱和蒸汽湿度或过热蒸汽含盐量测定方法

C.3.1 硝酸银滴定法（氯根法）

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

C.3.1.2 用硝酸银滴定法测定饱和蒸汽湿度。用硝酸银滴定法分别测得饱和蒸汽凝结水氯离子含量和锅水氯离子含量，按式（C.3）计算饱和蒸汽湿度：

$$\omega = \frac{C_{\text{Sat.H}_2\text{O.Cl}^-}}{C_{\text{BW.H}_2\text{O.Cl}^-}} \times 100 \quad \dots\dots\dots (\text{C.3})$$

式中：

ω ——饱和蒸汽湿度，%；

$C_{\text{Sat.H}_2\text{O.Cl}^-}$ ——饱和蒸汽凝结水氯离子含量，mg/kg；

$C_{\text{BW.H}_2\text{O.Cl}^-}$ ——锅水氯离子含量，mg/kg。

C.3.2 钠度计法（pNa 电极法）

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

$$\omega = \frac{C_{\text{Sat.H}_2\text{O.Na}^+}}{C_{\text{BW.H}_2\text{O.Na}^+}} \times 100 \quad \dots\dots\dots (\text{C.4})$$

式中：

$C_{\text{Sat.H}_2\text{O.Na}^+}$ ——饱和蒸汽凝结水钠离子含量，mg/kg；

$C_{\text{BW.H}_2\text{O.Na}^+}$ ——锅水钠离子含量，mg/kg。

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

C.3.3 电导率法

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

$$\omega = \frac{\sigma_{\text{Sat.H}_2\text{O.TDS}}}{\sigma_{\text{BW.H}_2\text{O.TDS}}} \times 100 \quad \dots\dots\dots (\text{C.5})$$

式中：

$\sigma_{\text{Sat.H}_2\text{O.TDS}}$ ——饱和蒸汽凝结水电导率值， $\mu\text{S/cm}$ ；

$\sigma_{\text{BW.H}_2\text{O.TDS}}$ ——锅水电导率值， $\mu\text{S/cm}$ 。

C.3.3.2 电极常数按电极上校核的系数确定。

附 录 D

(资料性附录)

常用天然气成分中的气体特性

天然气成分中的气体特性见表 D.1。

表 D.1 天然气成分中的气体特性 (0℃, 标准大气压)

气体名称	分子式	密度/(kg/m ³)	低位发热量/(MJ/m ³)	高位发热量/(MJ/m ³)
甲烷	CH ₄	0.715 9	35.818	39.840
乙烷	C ₂ H ₆	1.341 8	63.76	69.79
丙烷	C ₃ H ₈	1.967 7	91.18	99.22
丁烷	C ₄ H ₁₀	2.593 7	118.61	128.66
戊烷	C ₅ H ₁₂	3.219 6	146.00	158.07
乙烯	C ₂ H ₄	1.251 9	59.04	63.06
丙烯	C ₃ H ₆	1.877 8	85.94	91.98
丁烯	C ₄ H ₈	2.503 7	113.38	121.42
苯	C ₆ H ₆	3.485 7	141.42	147.45
一氧化碳	CO	1.249 9	12.62	12.62
二氧化碳	CO ₂	1.963 8	—	—
氢气	H ₂	0.090 0	10.777	12.788
硫化氢	H ₂ S	1.520 8	23.10	25.12
氮气	N ₂	1.250 1	—	—
氧气	O ₂	1.427 8	—	—
二氧化硫	SO ₂	2.858 7	—	—

附录 E
(资料性附录)
常用气体特性

E.1 烟气成分和空气的比定压热容见表 E.1。

表 E.1 从 25℃到不同温度下烟气成分和空气的比定压热容

$t/^\circ\text{C}$	c_{p,CO_2} $\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$	c_{p,N_2} $\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$	c_{p,O_2} $\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$	$c_{p,\text{wv}}$ $\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$	$c_{p,\text{a.d}}$ $\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$	$c_{p,\text{CO}}$ $\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$	c_{p,H_2} $\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$
0	1.635 508	1.301 525	1.309 350	1.497 685	1.299 843	1.301 196	1.285 276
10	1.645 646	1.301 371	1.310 389	1.498 673	1.299 944	1.301 217	1.286 477
20	1.655 664	1.301 262	1.311 505	1.499 724	1.300 096	1.301 290	1.287 616
25	1.660 627	1.301 225	1.312 091	1.500 272	1.300 191	1.301 345	1.288 162
30	1.665 561	1.301 198	1.312 695	1.500 836	1.300 299	1.301 413	1.288 693
40	1.675 340	1.301 178	1.313 956	1.502 006	1.300 550	1.301 585	1.289 712
50	1.685 001	1.301 201	1.315 285	1.503 233	1.300 850	1.301 805	1.290 676
60	1.694 545	1.301 266	1.316 679	1.504 515	1.301 196	1.302 072	1.291 585
70	1.703 975	1.301 373	1.318 134	1.505 852	1.301 587	1.302 386	1.292 444
80	1.713 290	1.301 521	1.319 647	1.507 241	1.302 023	1.302 744	1.293 254
90	1.722 492	1.301 710	1.321 216	1.508 680	1.302 502	1.303 147	1.294 017
100	1.731 582	1.301 938	1.322 837	1.510 168	1.303 023	1.303 594	1.294 736
110	1.740 561	1.302 206	1.324 508	1.511 705	1.303 585	1.304 083	1.295 413
120	1.749 430	1.302 512	1.326 255	1.513 287	1.304 186	1.304 613	1.296 050
130	1.758 191	1.302 855	1.327 987	1.514 914	1.304 826	1.305 184	1.296 649
140	1.766 844	1.303 236	1.329 790	1.516 584	1.305 504	1.305 794	1.297 213
150	1.775 391	1.303 652	1.331 631	1.518 297	1.306 218	1.306 443	1.297 742
160	1.783 832	1.304 105	1.333 509	1.520 049	1.306 968	1.307 130	1.298 240
170	1.792 169	1.304 592	1.335 421	1.521 841	1.307 752	1.307 854	1.298 708
180	1.800 403	1.305 114	1.337 364	1.523 671	1.308 569	1.308 613	1.299 148
190	1.808 536	1.305 670	1.339 335	1.525 538	1.309 418	1.309 408	1.299 562
200	1.816 567	1.306 258	1.341 333	1.527 439	1.310 299	1.310 237	1.299 951
注：表中 c_{p,CO_2} 、 c_{p,N_2} 、 c_{p,O_2} 、 $c_{p,\text{wv}}$ 、 $c_{p,\text{a.d}}$ 、 $c_{p,\text{CO}}$ 、 c_{p,H_2} 分别为二氧化碳、氮气、氧气、水蒸气、干空气、一氧化碳、氢气的比定压热容。							

E.2 烟气成分和空气的平均比定压热容计算方法。

瞬时比定压热容按式 (E.1) 计算：

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

式中：

c_p ——瞬时比定压热容，kJ/(m³·℃)；

T_k ——工质温度，K；

a_i ——系数，按表 E.2 查取。

表 E.2 各种气体的 a_i 系数

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

平均比定压热容可结合表 E.2 瞬时比定压热容系数进行积分求解，按式（E.2）计算：

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

E.3 燃料气的比定压热容

E.3.1 燃料气的平均相对分子质量按式（E.3）计算：

$$M = \frac{1}{100} \sum_{i=1}^n \varphi_i M_i \dots\dots\dots (E.3)$$

式中：
M——燃料气的平均相对分子质量；
M_i——燃料气第*i*种成分的相对分子质量，按表 E.3 查取；
φ_i——燃料气第*i*种成分的体积分数，%。

E.3.2 燃料气成分的质量分数按式（E.4）计算：

$$\omega_i = \varphi_i \frac{M_i}{M} \dots\dots\dots (E.4)$$

式中：
ω_i——燃料气成分的质量分数，%。

E.3.3 燃料气各成分的比定压热容按式（E.5）计算：

$$c_{p,i} = (C_1 + C_2 T + C_3 T^2 + C_4 T^3) \times \frac{4.1868}{M_i} \dots\dots\dots (E.5)$$

式中：
C₁、C₂、C₃、C₄——成分比热容方程常数，按表 E.3 查取；
T——绝对温度，K，按式（E.6）计算：

$$T = t + 273.15 \dots\dots\dots (E.6)$$

式中：
t——燃料气温度，℃。

表 E.3 成分比热容方程常数和相对分子质量

成分	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	M _i
H ₂	6.483	2.215E-03	-3.289E-06	1.826E-09	2.016
CO	7.737	-3.07E-03	6.662E-06	-3.037E-09	28.010
CH ₄	4.598	12.45E-03	2.860E-06	-2.703E-09	16.043
C ₂ H ₆	0.886	56.02E-03	-27.71E-06	5.266E-09	42.081
C ₃ H ₈	-1.009	73.15E-03	-37.89E-06	7.678E-09	44.097
C ₄ H ₁₀	2.266	79.13E-03	-26.47E-06	-0.674E-09	58.124
N ₂	7.440	-3.24E-03	6.400E-06	-2.790E-09	28.013
CO ₂	4.728	17.54E-03	-23.38E-06	4.097E-09	44.010

E.3.4 燃料气比定压热容按式（E.7）计算：

$$c_{p,f} = \frac{1}{100} \sum_{i=1}^n \omega_i c_{p,i}$$

.....（E.7）

式中：

$c_{p,f}$ ——燃料气的比定压热容，kJ/（kg·℃）。

附录 F
(资料性附录)
计算示例

本附录提供了温度测量、压力测量、流量测量、输出热量计算、冷凝锅炉热效率计算等不确定度的计算方法。

F.1 温度测量不确定度计算方法

本示例说明如何测量给水温度及如何计算其不确定度。图 F.1 展示了该温度测量系统。

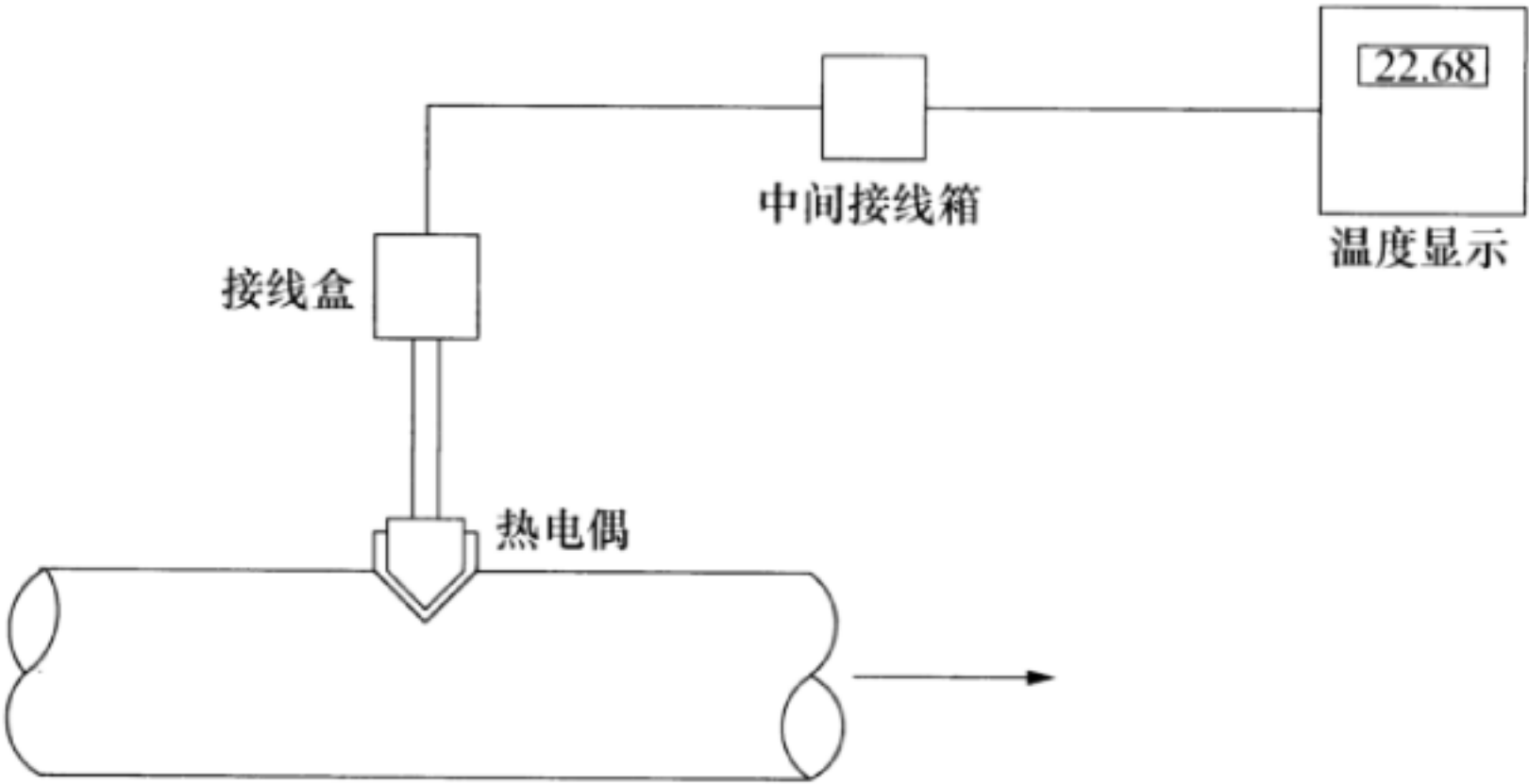


图 F.1 温度测量

在试验过程中，温度记录如下：22.9℃、23.1℃、22.6℃、22.5℃、22.6℃、22.5℃、22.6℃、22.6℃、22.7℃。该 9 个测量值的平均值和实验标准偏差分别为 22.68℃和 0.198 6℃。本标准提供的测量数据整理工作表可用于该项计算。表 F.1 所示为一完整的用于给水温度的测量数据整理工作表。其中，实验标准偏差被用作输出热量计算所示的整体 A 类标准不确定度计算的一部分。

该测量的 B 类标准不确定度是通过评估图 F.1 所示的测量系统来确定的。该示例需要评估以下各个偏差：

- a) 热电偶；
- b) 标定；
- c) 补偿导线；
- d) 冰槽；
- e) 热电偶套管位置；
- f) 流体分层；
- g) 接点处的环境条件；
- h) 中间接点；
- i) 电子干扰；
- j) 偏移；
- k) 电导率。

以上所列各 B 类标准不确定度中的偏差多数数值很小，在计算中可以被忽略。本标准提供的 B 类标准不确定度工作表能用于总结偏差数据并计算本测量的总的 B 类标准不确定度。表 F.2 为一个已完成的水温偏差数据整理工作表。

表 F.1 给水温度 A 类标准不确定度数据整理工作表

被测参数：给水温度（℃）			
l		修正系数	矫正后的数据
	测量数据		
a	22.9		
b	23.1		
c	22.6		
d	22.5		
e	22.6		
f	22.5		
g	22.6		
h	22.6		
i	22.7		
1	读取的数据量		9
2	平均值 $\{[1a]+[1b]+\cdots+[1i]\}/[1]$		22.68
3	实验标准偏差 $\left\{ \left[\frac{1}{([1]-1)} \right] \times \{ ([1a]-[2])^2 + ([1b]-[2])^2 + \cdots + ([1i]-[2])^2 \} \right\}^{1/2}$		0.198 6
4	A 类标准不确定度 $[3]/[1]^{1/2}$		0.066

表 F.2 给水温度 B 类标准不确定度数据整理工作表

被测参数：给水温度（℃）				
1		B 类标准不确定度来源	2	3
测量参数各自的 B 类标准不确定度			百分比 ^a	测量单位
<i>a</i>	热电偶或者 RTD 类型	校准数据	0.25	0
<i>b</i>	标定	包含在 1 项	0	0
<i>c</i>	补偿导线	工程判断	0	0.05
<i>d</i>	冰槽	可忽略	0	0
<i>e</i>	热电偶套管位置	可忽略	0	0
<i>f</i>	焊接点（绝热/未绝热）	可忽略	0	0
<i>g</i>	流体的分层	可忽略	0	0
<i>h</i>	接点处的环境条件	可忽略	0	0
<i>i</i>	热电偶的环境条件	可忽略	0	0
<i>j</i>	中间接点	可忽略	0	0
<i>k</i>	电子干扰	可忽略	0	0

表 F.2（续）

被测参数：给水温度（℃）				
1		B 类标准不确定度来源	2	3
测量参数各自的 B 类标准不确定度			百分比 ^a	测量单位
<i>l</i>	电导率	可忽略	0	0
<i>m</i>	漂移	工程判断	0	0.05
<i>n</i>	仪器系统	工程判断	0.1	0
给水温度测量的 B 类标准不确定度 $(a^2 + b^2 + c^2 + \cdots)^{1/2}$			2A	2B
			0.27	0.07
^a 此为读数的百分比。				

给水温度由 K 型标准热电偶测量。此热电偶的 B 类标准不确定度为 0.25%，该数值由校准证书提供的扩展不确定度确定。根据工程判断和类似测量系统的经验，假定补偿导线的 B 类标准不确定度为 0.05℃。温度测点的位置、流体分层程度、热电偶接点盒的环境条件、电子干扰以及电导率的影响很小，可以忽略。测量后没有对热电偶进行重新标定，因此假定有 0.05℃的漂移。基于以上的各个 B 类标准不确定度，可以计算得到给水温度的总 B 类标准不确定度范围为 0.27% 和 0.07℃。

应注意，有若干可减小本示例 B 类标准不确定度的措施，包括试验后的标定，或者使用高等级的热电偶。

F.2 压力测量不确定度计算方法

本示例说明如何测量给水压力及如何计算其不确定度。图 F.2 展示了该压力测量系统。

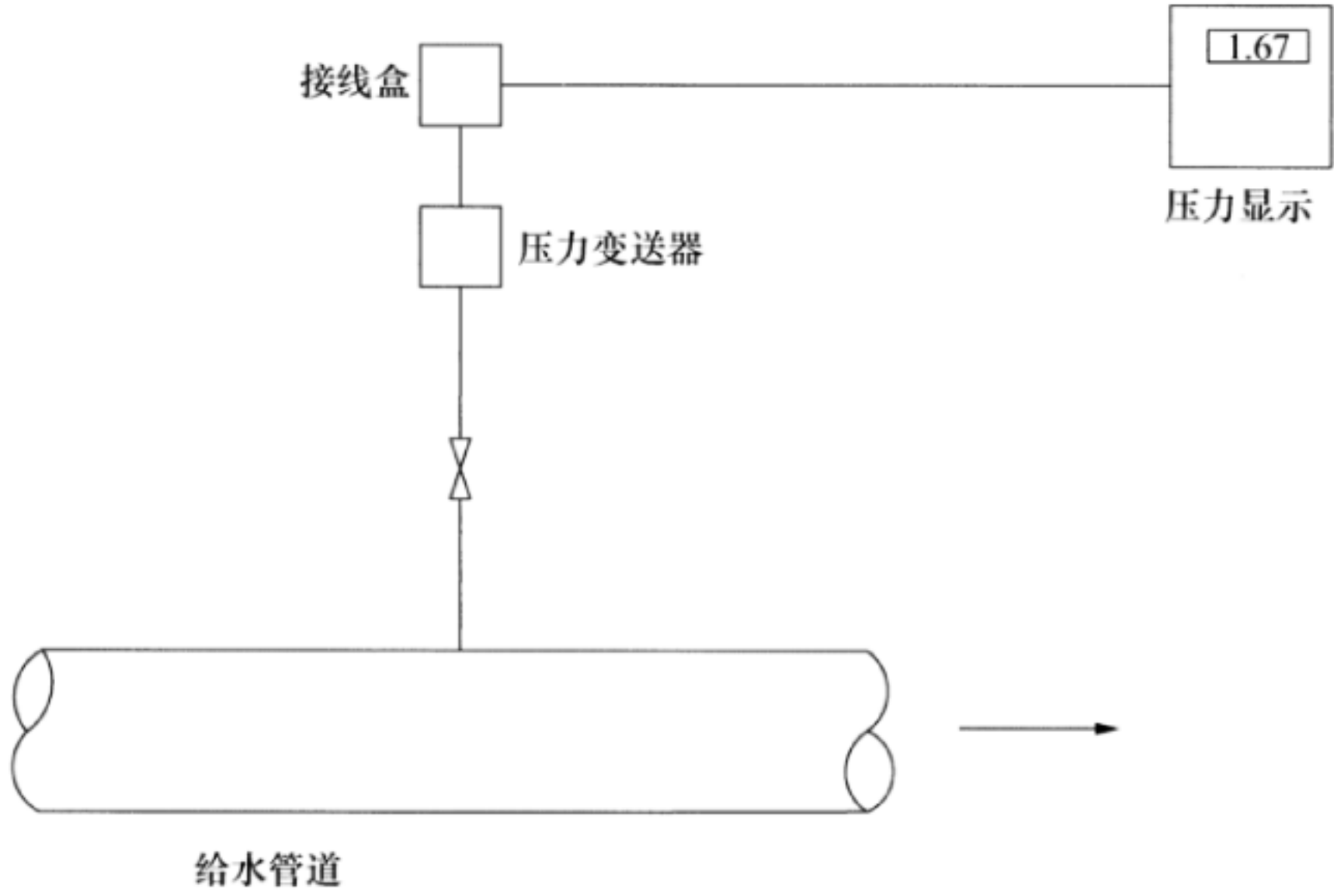


图 F.2 压力测量

在试验过程中，压力记录如下：1.68MPa、1.67MPa、1.64MPa、1.66MPa、1.68MPa、1.64MPa、1.67MPa、1.69MPa 和 1.68MPa。该 9 个测量值的平均值和实验标准偏差分别为 1.67MPa 和 0.017 9MPa。本标准提供的测量数据整理工作表可用于实施该项计算。表 F.3 所示为一完整的用于给水压力的测量数据整理工作表。其中，实验标准偏差被用作输出热量计算所示整体

A 类标准不确定度计算的一部分。

该测量的 B 类标准不确定度是通过评估图 F.2 所示的测量系统来确定的。该示例需要评估以下各个偏差：

- a) 变送器；
- b) 标定；
- c) 位置；
- d) 变送器的环境条件；
- e) 接点处的环境条件；
- f) 电子干扰；
- g) 偏移；
- h) 静压和大气压力。

以上所列各 B 类标准不确定度中的偏差多数数值很小，在计算中可以被忽略。本标准提供的 B 类标准不确定度工作表能用于总结偏差数据并计算本测量的 B 类标准不确定度。表 F.4 为一完整的给水压力 B 类标准不确定度数据整理工作表。

给水压力由标准压力表来测量。此压力表的测量量程为 0MPa~2.5MPa，基准精度 B 类标准不确定度为 0.25%，该数值由校准证书提供的精度等级确定。压力测点的位置、流体分层程度、热电偶接点盒的环境条件、电子干扰以及电导率的影响很小，可以忽略。测量后没有对压力表进行重新标定，因此假定有 0.005MPa 的漂移。基于以上的各个 B 类标准不确定度，可以计算得到给水压力的总 B 类标准不确定度为 0.25% 和 0.01MPa。

应注意，有若干可减小本示例 B 类标准不确定度的措施，包括使用更精确的测量装置。

表 F.3 给水压力 A 类标准不确定度数据整理工作表

被测参数：给水压力（MPa）			
1		修正系数	矫正后的数据
	测量数据		
<i>a</i>	1.67		
<i>b</i>	1.64		
<i>c</i>	1.66		
<i>d</i>	1.68		
<i>e</i>	1.64		
<i>f</i>	1.67		
<i>g</i>	1.69		
<i>h</i>	1.68		
<i>i</i>	1.67		
1	读取的数据量		9
2	平均值 $\{[1a]+[1b]+\cdots+[1i]\}/[1]$		1.67
3	实验标准偏差 $\left\{ \left[\frac{1}{([1]-1)} \right] \times \{ ([1a]-[2])^2 + ([1b]-[2])^2 + \cdots + ([1i]-[2])^2 \} \right\}^{1/2}$		0.017 9
4	A 类标准不确定度 $[3]/[1]^{1/2}$		0.006

表 F.4 给水压力 B 类标准不确定度数据整理工作表

被测参数：给水压力（MPa）				
1		B 类标准不确定度来源	2	3
测量参数各自的 B 类标准不确定度			百分比 ^a	测量单位
<i>a</i>	压力表或者变送器类型	校准数据	0.25	0
<i>b</i>	标定	包含在 1 项		0
<i>c</i>	取压口位置	可忽略		0
<i>d</i>	变送器的环境条件	制造商数据		0.005
<i>e</i>	接点处的环境条件	可忽略		0
<i>f</i>	电子干扰	可忽略		0
<i>g</i>	漂移	制造商数据		0.005
<i>h</i>	静压与大气压力	在标定中		
<i>i</i>				
<i>j</i>				
<i>k</i>				
<i>l</i>				
<i>m</i>				
<i>n</i>				
给水压力测量的 B 类标准不确定度 $(a^2 + b^2 + c^2 + \cdots)^{1/2}$			2A	2B
			0.27	0.071
^a 此为读数的百分比。				

F.3 流量测量不确定度计算方法

本示例说明如何测量给水流量及如何计算其不确定度。图 F.3 展示了该流量测量系统。在实验过程中给水流量测量使用累积法测试流量的，A 类标准不确定度可以忽略。

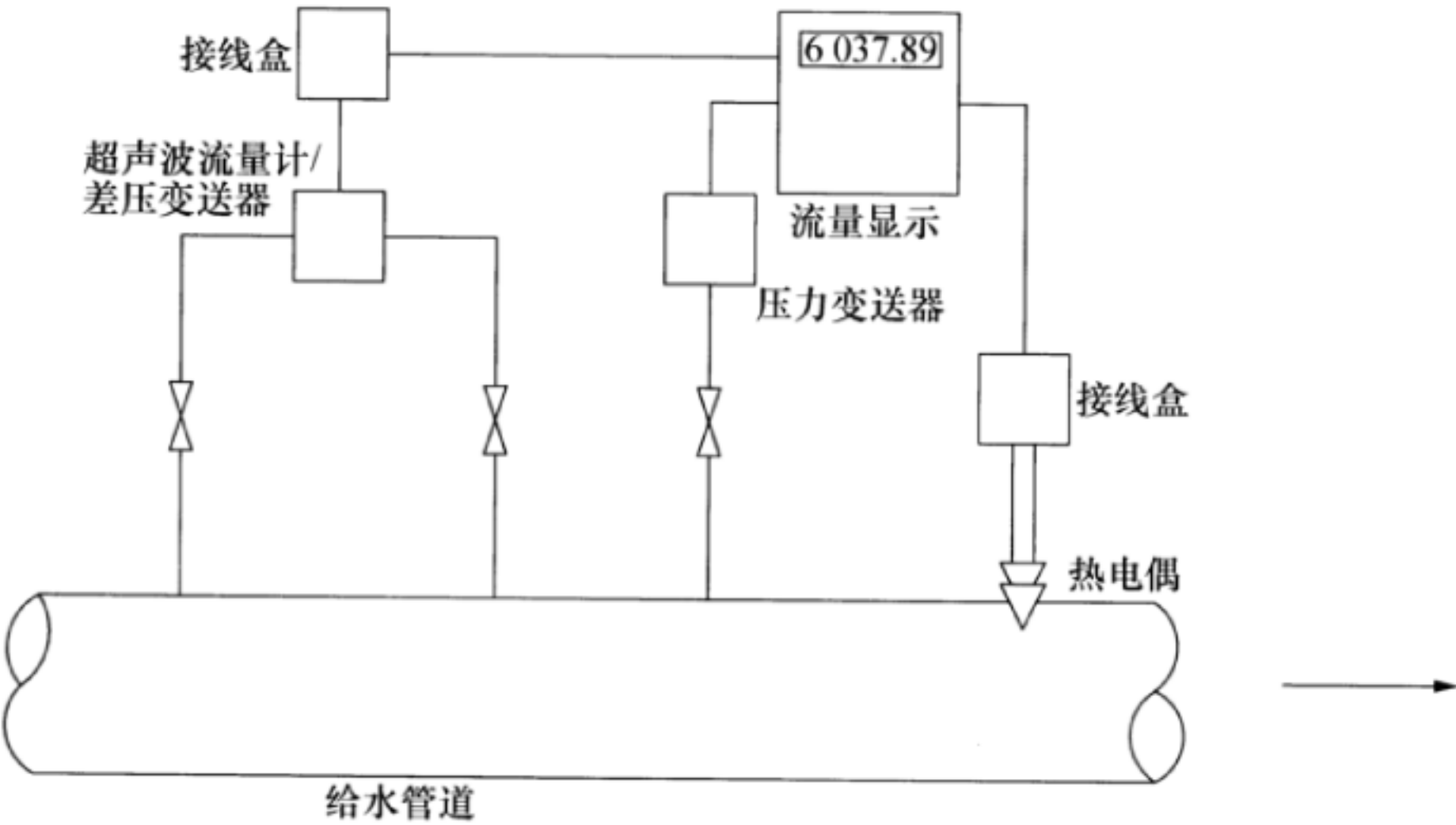


图 F.3 流量测量

该测量的 B 类标准不确定度是通过评估图 F.3 所示的测量系统来确定的。该示例需要评估以下各个偏差：

- a) 一次元件的标定；
- b) 流体分层；
- c) 温度系统不确定度；
- d) 压力系统不确定度；
- e) 安装；
- f) 喷嘴状况；
- g) 压力修正（密度影响）；
- h) 温度修正（密度影响）；
- i) 雷诺数修正；
- j) 测量位置。

以上所列各 B 类标准不确定度中的偏差多数是很小的，在计算中可以被忽略。本规程提供的 B 类标准不确定度工作表能用于总结偏差数据并计算本测量的总的 B 类标准不确定度。表 F.5 为一个已完成的给水流量的 B 类标准不确定度数据整理工作表。

给水流量由经标定的超声波流量计测量。测量前对超声波流量计进行检定，该超声波流量计的 B 类标准不确定度为 0.5%。测试过程的雷诺数与实验室标定工况接近，因此，可以考虑忽略该偏差。确定的给水压力的 B 类标准不确定度为 0.25% 和 0.01MPa，但该值对给水密度的影响可以忽略不计。已确定的给水温度的 B 类标准不确定度为 0.27% 和 0.07℃，对给水密度的影响为 0.01%。因热膨胀造成的系统不确定度为 0.10%，并指定测量系统的 B 类标准不确定度为 0.10%。

基于以上各项 B 类标准不确定度，计算得到的给水流量的总 B 类标准不确定度为 0.51%。

应注意，有若干可减小本示例 B 类标准不确定度的措施，包括使用更精确的测量装置。

表 F.5 给水流量 B 类标准不确定度数据整理工作表

被测参数：给水流量（kg/h）				
1		B 类标准不确定度来源	2	3
测量参数各自的 B 类标准不确定度			百分比 ^a	测量单位
<i>a</i>	一次元件标定	标定	0.5	0
<i>b</i>	流体分层	可忽略	0	0
<i>c</i>	安装	可忽略	0	0
<i>d</i>	压力修正	计算	0	0
<i>e</i>	温度修正	计算	0.01	0
<i>f</i>	雷诺数修正	可忽略	0	0
<i>g</i>	测量位置	可忽略	0	0
<i>h</i>	热膨胀	工程判断	0.1	0
<i>i</i>	系统误差	工程判断	0.1	0
<i>j</i>				
<i>k</i>				
<i>l</i>				
给水流量测量的 B 类标准不确定度 $(a^2 + b^2 + c^2 + \dots)^{1/2}$			2A	2B
			0.52	0.00
^a 此为读数的百分比。				

F.4 输出热量不确定度计算方法

本示例的目的是说明如何计算锅炉输出热量及计算其不确定度。基于以下若干原因，本标准推荐，锅炉系统输出热量的不确定度计算与效率无关：

- a) 一般情况下，输出热量是一个应保证的或不取决于效率的计算参数。
- b) 与输出热量有关的各个被测参数一般对效率的影响较小，但是，输出热量的整体不确定度会有较大的影响。
- c) 输出热量的不确定度的计算简化了效率不确定度所需要的计算。

输出热量所需记录的测量数据如下：

- 1) 给水流量；
- 2) 给水温度；
- 3) 给水压力；
- 4) 饱和蒸汽压力；
- 5) 蒸汽湿度；
- 6) 炉水取样量。

表 F.6 为输出热量计算表格，计算的该锅炉的输出热量为 15 870.41MJ/h。图 F.1～图 F.3 说明如何测量给水温度、压力、流量以及计算不确定度。其他参数的不确定度按类似方法确定。

本标准提供的输出热量不确定度工作表能用于计算输出热量测量的不确定度。表 F.7 给出一个已完成的输出热量不确定度表。完成这些计算需要提供每一测量的平均值、标准偏差、读数次数及偏差极限。

表 F.6 输出热量计算表

序号	名称	符号	单位	数据来源	测试数据
1	给水流量	$Mr_{FW,FI}$	kg/h	试验数据	6 037.89
2	锅水取样量	$Mr_{BW,Sa}$	kg/h	试验数据	43.6
3	蒸汽压力(表压)	$p_{st,Sat}$	MPa	试验数据	1.57
4	饱和蒸汽焓	H_{Sat}	kJ/kg	查表	2 794.06
5	饱和蒸汽湿度	ω	%	试验数据	2.85
6	水的汽化潜热	γ	kJ/kg	查表	1 926.34
7	给水温度	t_{FW}	℃	试验数据	22.68
8	给水压力	p_{FW}	MPa	试验数据	1.67
9	给水焓	H_{FW}	kJ/kg	查表	96.78
10	输出热量	$Q_{r,O,Sat}$	MJ/h	计算	15 870.41

表 F.7 输出热量不确定度计算表

序号	项 目	平均值	B 类标准		B 类标准不确定度合成	读数次数	A 类标准不确定度	自由度	百分比变化	微小增量变化	重新计算输出热量	灵敏度系数	试验结果的 A 类标准不确定度的自由度	B 类标准不确定度的自由度	试验结果的 B 类标准不确定度的贡献的自由度	试验结果的 B 类标准不确定度的贡献的自由度
			%	测量单位												
1	给水流量	6 037.89	0.52	0.00	31.38	0	0.00	0	1	60.38	16 029.95	2.64	0.00	18 511.66	82.92	2 553.44
2	锅水取样量	43.60	0.52	0.00	0.23	0	0.00	0	1	0.44	15 869.57	-1.93	0.00	18 511.66	-0.436 5	1.96E-06
3	蒸汽压力	1.57	0.25	0.01	0.01	9	0.004	8	1	0.016	15 871.92	96.14	0.003	18 843.18	0.78	1.94E-05
4	蒸汽湿度	2.85	0.00	0.10	0.10	5	0.005	4	1	0.029	15 867.09	-116.31	0.031	401.11	-11.70	46.77
5	给水温度	22.68	0.27	0.01	0.093	9	0.066 2	8	1	0.227	15 864.67	-25.29	0.98	29 463.07	-2.36	0.001
6	给水压力	1.67	0.25	0.01	0.008	9	0.006	8	1	0.017	15 870.29	-7.23	4.31E-07	20 679.77	-0.06	6.01E-10
7	基本输出热量															
8	试验结果的 A 类标准不确定度															
9	试验结果的 A 类标准不确定度贡献的自由度															
10	实验结果的 B 类标准不确定度															
11	试验结果的 B 类标准不确定度的自由度															
12	试验结果的整体自由度															
13	试验的整体自由度 t ——分布 (k)															
14	合成标准不确定度															
15	扩展不确定度															

F.5 冷凝锅炉热效率计算

F.5.1 由输入-输出法计算效率

本方法所需的数据包括确定输出热量（见表 F.6）和输入热量所必需的测量数据。输入热量由测定的燃料量及燃料低位发热量计算。输入-输出法锅炉热效率计算示例见表 F.8，其不确定度计算见表 F.9。

表 F.8 输入-输出法锅炉热效率计算表（示例）

序号	名 称	符号	单位	数据来源	测试数据
1	收到基甲烷	$\varphi_{\text{CH}_4\cdot\text{g}}$	%	化验数据	91.561
2	收到基乙烷	$\varphi_{\text{C}_2\text{H}_6\cdot\text{g}}$	%	化验数据	5.719
3	收到基丙烷	$\varphi_{\text{C}_3\text{H}_8\cdot\text{g}}$	%	化验数据	0.277
4	收到基丁烷	$\varphi_{\text{C}_4\text{H}_{10}\cdot\text{g}}$	%	化验数据	0.00
5	收到基戊烷	$\varphi_{\text{C}_5\text{H}_{12}\cdot\text{g}}$	%	化验数据	0.00
6	收到基氢气	$\varphi_{\text{H}_2\cdot\text{g}}$	%	化验数据	0.00
7	收到基氧气	$\varphi_{\text{O}_2\cdot\text{g}}$	%	化验数据	0.00
8	收到基氮气	$\varphi_{\text{N}_2\cdot\text{g}}$	%	化验数据	0.135
9	收到基一氧化碳	$\varphi_{\text{CO}\cdot\text{g}}$	%	化验数据	0.00
10	收到基二氧化碳	$\varphi_{\text{CO}_2\cdot\text{g}}$	%	化验数据	2.308
11	收到基硫化氢	$\varphi_{\text{H}_2\text{S}\cdot\text{g}}$	%	化验数据	0.00
12	收到基不饱和烃	$\varphi_{\sum \text{C}_m\text{H}_n\cdot\text{g}}$	%	化验数据	0.00
13	燃气所带的水量	$V_{\text{F.H}_2\text{O}\cdot\text{g}}$	%	化验数据	0.00
14	气体燃料含灰量	$V_{\text{F.Ash}\cdot\text{g}}$	g/m ³	化验数据	0.00
15	收到基低位发热量	$Q_{\text{net.ar}}$	kJ/m ³	计算	36 648.30
16	给水流量	$Mr_{\text{FW.FI}}$	kg/h	试验数据	6 037.89
17	锅水取样量	$Mr_{\text{BW.Sa}}$	kg/h	试验数据	43.6
18	蒸汽压力（表压）	$p_{\text{st.Sat}}$	MPa	试验数据	1.57
19	饱和蒸汽焓	H_{Sat}	kJ/kg	查表	2 794.06
20	蒸汽湿度	ω	%	试验数据	2.85
21	汽化潜热	γ	kJ/kg	查表	1 926.34
22	给水温度	t_{FW}	℃	试验数据	22.68
23	给水压力	p_{FW}	MPa	试验数据	1.67
24	给水焓	H_{FW}	kJ/kg	查表	96.78
25	输出热量	$Q_{\text{r.O.Sat}}$	MJ/h	计算	15 870.41
26	燃料的体积流量	$V_{\text{r.FI}}$	m ³ /h	试验数据	436.98
27	基于低位发热量的燃料显热带来的外来热量	$q_{\text{p.B.F.net}}$	kJ/m ³	试验数据	0.00
28	输入热量	Q_{rI}	kJ/m ³	计算	36 648.30
29	锅炉热效率	η	%	计算	99.10

表 F.9 输入-输出法不确定度计算表

序 号	项 目	平均值	B 类标准 不确定度		B 类标准 不确定度 合成	读 数 次 数	A 类标 准不确 定度	自 由 度	百分 比变 化	微小增 量变化	重新计算 热效率	灵敏 系数	试验结果 的 A 类标 准不确 定度	试验结果的 A 类标准不 确定度贡献 的自由度	B 类标准不 确定度的自 由度	试验结果的 B 类标准不 确定度	试验结果的 B 类 标准不确定度贡 献的自由度
			%	测量 单位													
1	收到基甲烷	91.561	0.04	0.00	0.036 6	0	0.00	0	1	0.915 6	98.221 9	-0.958 78	0.00	0.00	3 125 000	-0.035 11	4.87E-13
2	收到基乙烷	5.719	0.025	0.00	0.001 4	0	0.00	0	1	0.057 2	99.001 4	-1.719 95	0.00	0.00	8 000 000	-0.002 46	4.57E-18
3	收到基丙烷	0.277	0.02	0.00	0.000 1	0	0.00	0	1	0.002 8	99.092 9	-2.463 82	0.00	0.00	12 500 000	-0.000 14	2.78E-23
4	收到基丁烷	0.00	0.005	0.00	0.00	0	0.00	0	1	0.00	99.099 8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	收到基戊烷	0.00	0.005	0.00	0.00	0	0.00	0	1	0.00	99.099 8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	收到基氢气	0.00	0.005	0.00	0.00	0	0.00	0	1	0.00	99.099 8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7	收到基氧气	0.00	0.005	0.00	0.00	0	0.00	0	1	0.00	99.099 8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8	收到基氮气	0.135	0.02	0.00	0.00	0	0.00	0	1	0.001 4	99.099 8	0.00	0.00	0.00	12 500 000	0.00	0.00
9	收到基一氧化碳	0.00	0.005	0.00	0.00	0	0.00	0	1	0.00	99.099 8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	收到基二氧化碳	2.308	0.025	0.00	0.000 6	0	0.00	0	1	0.023 1	99.099 8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
11	收到基硫化氢	0.00	0.005	0.00	0.00	0	0.00	0	1	0.00	99.099 8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
12	收到基不饱和烃	0.00	0.005	0.00	0.00	0	0.00	0	1	0.00	99.099 8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
13	燃气所带的水量	0.00	0.005	0.00	0.00	0	0.00	0	1	0.00	99.099 8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
14	气体燃料含灰量	0.00	0.005	0.00	0.00	0	0.00	0	1	0.00	99.099 8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
15	燃料消耗量	436.98	0.5	0.00	2.184 9	0	0.00	0	1	4.369 8	98.118 6	-0.224 54	0.00	0.00	20 000	-0.490 59	2.90E-06
16	给水流量	6 037.89	0.519 7	0.00	31.379 6	0	0.00	0	1	60.378 9	100.096 0	0.016 5	0.000 0	0.000 0	18 511.66	0.517 758	3.88E-06
17	锅水取样量	43.60	0.519 7	0.00	0.226 6	0	0.00	0	1	0.436 0	99.094 5	-0.012 03	0.000 0	0.000 0	18 511.66	-0.002 73	2.98E-15

表 F.9 (续)

序号	项 目	平均值	B 类标准 不确定度		B 类标准 不确定度合成 测量单位	读 数 次 数	A 类标准 不确定度	自 由 度	百分 比 变 化	微小增 量变化	重新计算 热效率	灵敏 系数	试验结果 的 A 类标准 不确定度	试验结果的 A 类标准不 确定度贡献 的自由度	B 类标准不 确定度的自 由度	试验结果的 B 类标准不 确定度	试验结果的 B 类标准不 确定度贡献 的自由度
			%	测量 单位													
18	蒸汽压力(表压)	1.57	0.25	0.007 1	0.008 1	9	0.004 1	8	1	0.015 7	99.109 2	0.600 358	0.002 451	4.51E-12	18 843.18	0.004 9	2.95E-14
19	蒸汽湿度	2.85	0.00	0.100 6	0.100 6	5	0.005 1	4	1	0.028 5	99.079 1	-0.726 28	-0.003 7	4.7E-11	401.11	-0.073 1	7.115E-08
20	给水温度	22.68	0.269 3	0.070 7	0.093 4	9	0.066 2	8	1	0.226 8	99.063 9	-0.157 92	-0.010 45	1.49E-09	29 463.07	-0.014 8	1.61E-12
21	给水压力	1.67	0.250 0	0.007 1	0.008 2	9	0.006 0	8	1	0.016 7	99.099 0	-0.045 15	-0.000 27	6.55E-16	20 679.77	-0.000 4	9.14E-19
22	正平衡热效率					99.10											
23	试验结果的 A 类标准不确定度					0.01											
24	试验结果的 A 类标准不确定度贡献的自由度					10.79											
25	试验结果的 B 类标准不确定度					0.72											
26	试验结果的 B 类标准不确定度贡献的自由度					38 809											
27	试验结果的整体自由度					50											
28	试验的整体自由度 t ——分布 (k)					2.00											
29	合成标准不确定度					0.72											
30	扩展不确定度					1.44											

F.5.2 由能量平衡法计算锅炉热效率

表 F.10 和表 F.11 所示为能量平衡法热效率计算表和能量平衡法不确定度计算表。对基于能量平衡法的效率试验来说，确定锅炉输出热量所需的汽/水侧测量数据与输入-输出法相同，但是，通过以下不确定度结果能观察到，输出热量对由能量平衡法计算的效率的影响并不显著。因此，用来测量输出热量的仪表精度就不是很关键了。

能量平衡法不需要测量燃料量。所有利用燃料量均基于测量的输出热量和由计算的效率确定的燃料量。对燃料取样的要求与输入-输出法一样。除了测量燃料的发热量和密度外，还必须进行燃料的元素分析。除了输入-输出法所要求的测量数据外，空气和烟气测量为主要的测量。

冷凝锅炉示例的效率不确定度工作表，就本锅炉，列出了按能量平衡法计算效率所需要的被测量。通过比较采用能量平衡法和采用输入-输出法试验结果的不确定度，可评估其试验质量。可注意到，即使在输入-输出法中谨慎采用经标定的给水和燃气流量计，其结果的扩展不确定度仍为 1.44%，而采用合适等级测量仪表的能量平衡法的结果扩展不确定度为 0.33%。

表 F.10 能量平衡法热效率计算表

序号	名称	符号	单位	数据来源	数据
一、燃料特性					
1	收到基甲烷	$\varphi_{\text{CH}_4\cdot\text{g}}$	%	化验数据	91.56
2	收到基乙烷	$\varphi_{\text{C}_2\text{H}_6\cdot\text{g}}$	%	化验数据	5.72
3	收到基丙烷	$\varphi_{\text{C}_3\text{H}_8\cdot\text{g}}$	%	化验数据	0.28
4	收到基丁烷	$\varphi_{\text{C}_4\text{H}_{10}\cdot\text{g}}$	%	化验数据	0.00
5	收到基戊烷	$\varphi_{\text{C}_5\text{H}_{12}\cdot\text{g}}$	%	化验数据	0.00
6	收到基氢气	$\varphi_{\text{H}_2\cdot\text{g}}$	%	化验数据	0.00
7	收到基氧气	$\varphi_{\text{O}_2\cdot\text{g}}$	%	化验数据	0.00
8	收到基氮气	$\varphi_{\text{N}_2\cdot\text{g}}$	%	化验数据	0.14
9	收到基一氧化碳	$\varphi_{\text{CO}\cdot\text{g}}$	%	化验数据	0.00
10	收到基二氧化碳	$\varphi_{\text{CO}_2\cdot\text{g}}$	%	化验数据	2.31
11	收到基硫化氢	$\varphi_{\text{H}_2\text{S}\cdot\text{g}}$	%	化验数据	0.00
12	收到基不饱和烃	$\varphi_{\sum \text{C}_m\text{H}_n\cdot\text{g}}$	%	化验数据	0.00
13	燃气所带的水量	$V_{\text{F,H}_2\text{O}\cdot\text{g}}$	%	化验数据	0.00
14	气体燃料含灰量	$V_{\text{F,Ash}\cdot\text{g}}$	g/m ³	化验数据	0.00
15	收到基燃料低位发热量	$Q_{\text{net,ar}}$	kJ/m ³	计算	36 648.30
16	给水流量	$Mr_{\text{FW,Fl}}$	kg/h	试验数据	6 037.89
17	锅水取样量	$Mr_{\text{BW,Sa}}$	kg/h	试验数据	43.6
18	蒸汽压力（表压）	$p_{\text{st,Sat}}$	MPa	试验数据	1.57
19	饱和蒸汽焓	H_{Sat}	kJ/kg	计算数据	2 794.06
20	蒸汽湿度	ω	%	试验数据	2.85
21	水的汽化潜热	γ	kJ/kg	试验数据	1 926.34
22	给水温度	t_{FW}	℃	试验数据	22.68

表 F.10 (续)

序号	名称	符号	单位	数据来源	数据
一、燃料特性					
23	给水压力	p_{FW}	MPa	试验数据	1.67
24	给水焓	H_{FW}	kJ/kg	计算数据	96.78
25	输出热量	$Q_{r,O.Sat}$	MJ/h	计算数据	15 870.41
26	输入热量	Q_{η}	kJ/m ³	计算数据	36 648.30
27	锅炉热效率	η	%	计算数据	99.45
28	燃料的体积流量	$V_{r,F.I}$	m ³ /h	计算数据	435.44
二、热损失计算					
29	离开系统边界的烟气温度	$t_{fg,Cond.Lv}$	℃	试验数据	57.18
30	基准温度	$t_{fg,Cond.Re}$	℃	计算数据	25.00
31	烟气中二氧化碳的体积分数	$\varphi_{CO_2,fg}$	%	试验数据	11.22
32	二氧化碳的比定压热容	c_{p,CO_2}	kJ/(m ³ ·℃)	计算数据	1.66
33	烟气中氧气的体积分数	$\varphi_{O_2,fg}$	%	试验数据	2.48
34	氧气的比定压热容	c_{p,O_2}	kJ/(m ³ ·℃)	计算数据	1.31
35	天然气中一氧化碳的体积分数	$\varphi_{CO,g}$	%	试验数据	0.02
36	一氧化碳的比定压热容	$c_{p,CO}$	kJ/(m ³ ·℃)	计算数据	1.30
37	烟气中氢气的体积分数	$\varphi_{H_2,fg}$	%	试验数据	0.00
38	氢气的比定压热容	c_{p,H_2}	kJ/(m ³ ·℃)	计算数据	1.28
39	烟气中碳氢化合物的体积分数	$\varphi_{\sum C_m H_n,fg}$	%	试验数据	0.00
40	碳氢化合物的比定压热容	$c_{p,\sum C_m H_n}$	kJ/(m ³ ·℃)	计算数据	1.60
41	烟气中二氧化硫的体积分数	$\varphi_{SO_2,fg}$	%	试验数据	0.00
42	烟气中氮气的体积分数	$\varphi_{N_2,fg}$	%	计算数据	86.28
43	氮气的比定压热容	c_{p,N_2}	kJ/(m ³ ·℃)	计算数据	1.30
44	最后一级冷凝受热面出口干烟气的平均比定压热容	$c_{p,fg,d}$	kJ/(m ³ ·℃)	计算数据	1.35
45	燃用天然气的理论干空气量	$V_{a,d,th,g}$	m ³ /m ³	计算数据	9.74
46	最后一级冷凝受热面出口每标准立方米燃料燃烧生成的干烟气体积	$V_{fg,d,Cond.Lv}$	m ³ /m ³	计算数据	8.76
47	基于低位发热量的干烟气损失	$q_{p,L,fg,d,net}$	%	计算数据	1.04
48	最后一级冷凝受热面进口的烟气相对湿度	$h_{ab,fg,Cond.En}$	%	试验数据	22.32
49	伴热烟气 t_2 温度	t_2	K	试验数据	366.35
50	伴热温度下水蒸气饱和压力	p_{st,Sat,t_i}	hPa	计算数据	790.49
51	$\ln p_{st,Sat}$	—	—	计算数据	2.90
52	当地大气压力	p_{at}	Pa	试验数据	101 000.00
53	最后一级冷凝受热面出口烟气的含湿量	$h_{ab,fg,Cond.Lv}$	kg/kg	试验数据	0.13
54	对应每立方米燃料的最后一级冷凝受热面出口烟气中水蒸气含量	$V_{fg,Cond,H_2O,g}$	m ³ /m ³	计算数据	1.92

表 F.10 (续)

序号	名称	符号	单位	数据来源	数据
二、热损失计算					
55	水蒸气比定压热容	c_{p,H_2O}	$\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$	计算数据	1.50
56	基于低位发热量的烟气携带水蒸气损失	$q_{p,L,fg,Cond.net}$	%	计算数据	0.25
57	干燃料气体密度	$\rho_{F,g}$	kg/m^3	化验数据	0.73
58	气体燃料绝对湿度,指每千克干气体燃料中水蒸气的质量	$h_{ab,F}$	kg/kg	化验数据	0.00
59	每立方米干气体燃料所携带的水蒸气量	$V_{F,H_2O,g}$	kg/m^3	化验数据	0.00
60	按干、湿球温度查得的空气相对湿度	$h_{RH,a}$	%	试验数据	65.00
61	被测空气温度	t_a	$^\circ\text{C}$	试验数据	26.61
62	空气温度下水蒸气分压力	$p_{st,Sat}$	Pa	计算数据	3 482.31
63	空气的绝对湿度,指每千克干空气中水蒸气的质量	$h_{ab,a}$	%	计算数据	0.01
64	烟气中过量空气系数	α	—	计算数据	1.13
65	空气携带的水蒸气量	$V_{a,H_2O,g}$	m^3/m^3	计算数据	0.25
66	每立方米干气体燃料中氢燃烧产生的水蒸气量	$V_{F,H_2,H_2O,g}$	m^3/m^3	计算数据	2.01
67	非冷凝烟气中的总水分	$V_{fg,H_2O,g}$	m^3/m^3	计算数据	2.27
68	最后一级冷凝受热面后烟气中的含水量	$V_{fg,Cond,H_2O,g}$	m^3/m^3	计算数据	1.92
69	最后一级冷凝受热面中烟气平均压力下的水蒸气汽化潜热	γ_{Cond}	kJ/kg	计算数据	2 250.41
70	冷凝下来的水蒸气量	$V_{fg,Cond,H_2O,l}$	m^3/m^3	计算数据	0.35
71	基于低位发热量的发生冷凝的水蒸气汽化潜热被吸收造成的损失	$q_{p,L,fg,Cond.net,l}$	%	计算数据	-1.69
72	基于低位发热量的烟气中一氧化碳、未燃碳氢物质造成的损失	$q_{p,L,fg,CO,HC.net}$	%	计算数据	0.07
73	平面投影面积	A_{src}	m^2	计算数据	83.26
74	燃料的体积流量	$V_{F,FI}$	m^3/h	计算数据	435.44
75	基于低位发热量由表面辐射和对流引起的损失	$q_{r,L,src.net}$	%	计算数据	0.87
76	基于燃料输入的热损失	q_{pL}	%	计算数据	0.55
三、外来热量热损失					
77	基于低位发热量的进入系统的干空气所携带的外来热量	$q_{p,B,a,d.net}$	%	计算数据	0.00
78	基于低位发热量的空气中水分带来的外来热量	$q_{p,B,H_2O.net}$	%	计算数据	0.00
79	基于低位发热量的燃料显热带来的外来热量	$q_{p,B,F.net}$	%	计算数据	0.00
80	基于低位发热量的辅机设备功率的外来热量	$q_{p,B,X.net}$	%	计算数据	0.00
81	锅炉热效率	η	%	计算数据	99.45

表 F.11 能量平衡法不确定度计算表

序号	项 目	平均值	B 类标准 不确定度		B 类标准 不确定度合成 测量单位	读数 次数	A 类标准 不确定度	自由度	百分比 变化	微小增 量变化	重新计算 热效率	灵敏 系数	试验结果 的 A 类标 准不确定 度贡献的 自由度	B 类标准 不确定度 的自由度	试验结果 的 B 类标 准不确定 度	试验结果的 B 类标准不 确定度贡献 的自由度
			%	测量 单位												
1	收到基甲烷	91.561	0.04	0.000 0	0.036 6	0	0.000 0	0	1	0.915 6	99.449 9	0.001 9	0.000 0	3 125 000	7.05E-05	7.920 3E-24
2	收到基乙烷	5.719	0.025	0.000 0	0.001 4	0	0.000 0	0	1	0.057 2	99.446 8	-0.023 9	0.000 0	8 000 000	-3.4E-05	1.693 0E-25
3	收到基丙烷	0.277	0.02	0.000 0	0.000 1	0	0.000 0	0	1	0.002 8	99.448 0	-0.049 7	0.000 0	12 500 000	-2.8E-06	4.586 5E-30
4	收到基丁烷	0.000 0	0.005	0.000 0	0.000 0	0	0.000 0	0	1	0.000 0	99.448 1	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0E+00
5	收到基戊烷	0.000 0	0.005	0.000 0	0.000 0	0	0.000 0	0	1	0.000 0	99.448 1	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0E+00
6	收到基氢气	0.000 0	0.005	0.000 0	0.000 0	0	0.000 0	0	1	0.000 0	99.448 1	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0E+00
7	收到基氧气	0.000 0	0.005	0.000 0	0.000 0	0	0.000 0	0	1	0.000 0	99.448 1	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0E+00
8	收到基氮气	0.135	0.02	0.000 0	0.000 0	0	0.000 0	0	1	0.001 4	99.448 1	0.000 0	0.000 0	12 500 000	0.000 0	0.000 0E+00
9	收到基一氧化碳	0.000 0	0.005	0.000 0	0.000 0	0	0.000 0	0	1	0.000 0	99.448 1	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0E+00
10	收到基二氧化碳	2.308	0.025	0.000 0	0.000 6	0	0.000 0	0	1	0.023 1	99.448 1	0.000 0	0.000 0	8 000 000	0.000 0	0.000 0E+00
11	收到基硫化氢	0.000 0	0.005	0.000 0	0.000 0	0	0.000 0	0	1	0.000 0	99.448 1	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0E+00
12	收到基不饱和烃	0.000 0	0.005	0.000 0	0.000 0	0	0.000 0	0	1	0.000 0	99.448 1	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0E+00
13	燃气所带的水量	0.000 0	0.005	0.000 0	0.000 0	0	0.000 0	0	1	0.000 0	99.448 1	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0E+00
14	气体燃料含灰量	0.000 0	0.005	0.000 0	0.000 0	0	0.000 0	0	1	0.000 0	99.448 1	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0E+00
15	给水流量	6 037.890	0.519 7	0.000 0	31.379 6	0	0.000 0	0	1	60.378 9	99.456 8	0.000 1	0.000 0	18 511.662	0.004 507	2.228 4E-4
16	锅水取样量	43.60	0.519 7	0.000 0	0.226 6	0	0.000 0	0	1	0.436 0	99.448 1	-0.000 1	0.000 0	18 511.662	-2.4E-05	1.781 6E-23
17	蒸汽压力	1.57	0.250 0	0.070 7	0.070 8	9	0.004 1	8	1	0.015 7	99.448 2	0.005 3	2.15E-05	245.732 87	0.000 374	7.941 8E-17
18	蒸汽湿度	2.85	0.000 0	0.100 6	0.100 6	5	0.005 1	4	1	0.028 5	99.448 0	-0.006 4	-3.3E-05	401.111 11	-0.000 64	4.252 0E-16

表 F.11 (续)

序号	项 目	平均值	B 类标准 不确定度		B 类标准 不确定度合成 测量单位	读数 次数	A 类标准 不确定度	自由 度	百分 比变 化	微小增 量变化	重新计算 热效率	灵敏 系数	试验结果 的 A 类标 准不确定 度	试验结果 的 A 类标 准不确定 度贡献的 自由度	B 类标准 不确定度 的自由度	试验结果 的 B 类标 准不确定 度	试验结果的 B 类标准不 确定度贡献 的自由度
			%	测量 单位													
19	给水温度	22.68	0.269 3	0.070 7	0.093 4	9	0.066 2	8	1	0.226 8	99.447 8	-0.001 4	-9.2E-05	8.94E-18	29 463.074	-0.000 13	9.625 1E-21
20	给水压力	1.67	0.250 0	0.070 7	0.070 8	9	0.006 0	8	1	0.016 7	99.448 1	-0.000 4	-2.4E-06	3.91E-24	277.921 13	-2.8E-05	2.249 5E-21
21	最后一级冷凝受 热面后烟气温度	57.18	0.269 3	0.070 7	0.169 4	46	0.358 6	45	1	0.571 8	99.424 4	-0.041 4	-0.014 86	1.08E-09	56 952.4	-0.007 02	4.267 5E-14
22	烟气中二氧化碳 的体积分数	11.22	0.500 0	0.000 0	0.056 1	9	0.027 8	8	1	0.112 2	99.447 8	-0.002 8	-7.8E-05	4.55E-18	200 00	-0.000 16	3.030 8E-20
23	烟气中氧气的体 积分数	2.48	0.500 0	0.000 0	0.012 4	9	0.020 6	8	1	0.024 8	99.449 8	0.066 1	0.001 362	4.31E-13	20 000	0.000 819	2.250 7E-17
24	烟气中一氧化碳 的体积分数	0.02	2.500 0	0.000 0	0.000 6	9	0.006 5	8	1	0.000 2	99.447 4	-3.019 3	-0.019 73	1.89E-08	800	-0.001 84	1.446 1E-14
25	烟气中氢气的体 积分数	0.00	2.500 0	0.000 0	0.000 0	9	0.000 0	8	1	0.000 0	99.448 1	0.000 0	0	0	0	0	0.000 0E+00
26	烟气中不饱和和 烃的体积分数	0.00	2.500 0	0.000 0	0.000 0	9	0.000 0	8	1	0.000 0	99.448 1	0.000 0	0	0	0	0	0.000 0E+00
27	烟气中二氧化硫 的体积分数	0.00	1.000 0	0.000 0	0.000 0	9	0.000 0	8	1	0.000 0	99.448 1	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0E+00
28	伴热烟气的相对 湿度	22.32	1.000 0	0.000 0	0.223 2	46	0.056 7	45	1	0.223 2	99.332 5	-0.518 0	-0.029 39	1.67E-08	5 000	-0.115 62	3.573 6E-08
29	伴热烟气温度	93.20	0.250 0	0.000 0	0.233 0	48	0.067 3	47	1	0.932 0	99.042 5	-0.435 2	-0.029 3	1.58E-08	80 000	-0.101 4	1.321 6E-09
30	当地大气压力	101 000	0.012 5	0.000 0	12.625 0	0	0.000 0	0	1	1 010	99.548 9	0.000 1	0.000 0	0.000 0	3.2E+07	0.001 3	7.853 5E-20
31	气体燃料密度	0.73	1.000 0	0.000 0	0.007 3	0	0.000 0	0	1	0.007 3	99.448 2	0.002 9	0	0	5 000	2.11E-05	3.986 7E-23
32	气体燃料湿度	0.00	1.000 0	0.000 0	0.000 0	0	0.000 0	0	1	0.000 0	99.448 2	4.402 0	0	0	5 000	2.11E-05	3.986 7E-23
33	空气的相对湿度	65.00	1.000 0	0.000 0	0.650 0	0	0.000 0	0	1	0.650 0	99.460 6	0.019 1	0	0	5 000	0.012 43	4.774 5E-12

表 F.11 (续)

序 号	项 目	平均值	B 类标准 不确定度		B 类标准 不确定度合成	读数 次数	A 类标准 不确定度	自由 度	百分 比变 化	微小增 量变化	重新计算 热效率	灵敏 系数	试验结果 的 A 类标 准不确定 度	试验结果 的 A 类标 准不确定 度贡献的 自由度	B 类标准 不确定度 的自由度	试验结果 的 B 类标 准不确定 度	试验结果的 B 类标准不 确定度贡献 的自由度
			%	测量 单位													
34	空气温度	26.61	0.250 0	0.000 0	0.066 5	9	0.183 7	8	1	0.266 1	99.467 7	0.073 5	0.013 492	4.14E-09	80 000	0.004 887	7.128 2E-15
35	平面投影 面积	83.26	1.000 0	0.000 0	0.832 6	0	0.000 0	0	1	0.832 6	99.439 5	-0.010 4	0	0	5 000	-0.008 62	1.106 3E-12
36	反平衡热效率																
37	试验结果的 A 类标准不确定度																
38	A 类标准不确定度贡献的自由度																
39	试验结果的 B 类标准不确定度																
40	试验结果的 B 类标准不确定度贡献的自由度																
41	试验结果的整体自由度																
42	试验的整体自由度 t ——分布（ k ）																
43	合成标准不确定度																
44	扩展不确定度																

参 考 文 献

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