

中华人民共和国国家标准

GB 10863—89

烟道式余热锅炉热工试验方法

Thermal test method for gas pass waste heat boiler

1 主题内容与适用范围

本标准规定了烟道式余热锅炉热工试验方法,作为烟道式余热锅炉性能验收、鉴定试验的基础。

本标准适用于额定蒸汽压力大于或等于 0.1 MPa,或热水产热量大于或等于 0.058 MW 的烟道式余热锅炉。

额定蒸汽压力小于 0.1 MPa 或热水产热量小于 0.058 MW 的烟道式余热锅炉热工试验可参照本标准进行。

本标准不适用于管壳式余热锅炉。

2 引用标准

GB 1576 低压锅炉水质标准

GB 10180 工业锅炉热工试验规范

GB 10184 电站锅炉性能试验规程

3 术语

3.1 输入热量

单位时间内进入余热锅炉的余热资源热量。

3.2 有效输出热量

单位时间内余热锅炉所产蒸汽或热水所含热量与给水或进水所含热量之差。

3.3 基准温度

本标准规定环境温度为基准温度,以此作为各项输入热量和各项损失热量计算的起点。

3.4 发热量

指进入余热锅炉的余热资源中所含可燃物质的低位发热量。

3.5 余热利用率

余热锅炉有效输出热量占输入热量的百分数:

$$\text{余热利用率} = \frac{\text{有效输出热量}}{\text{输入热量}} \times 100\%$$

4 试验条件及其规定

4.1 余热锅炉热平衡系统的划归

根据能量平衡的原理,简化和划归余热锅炉的热平衡系统,作出余热锅炉测试系统的热平衡系统图,如图 1 所示。

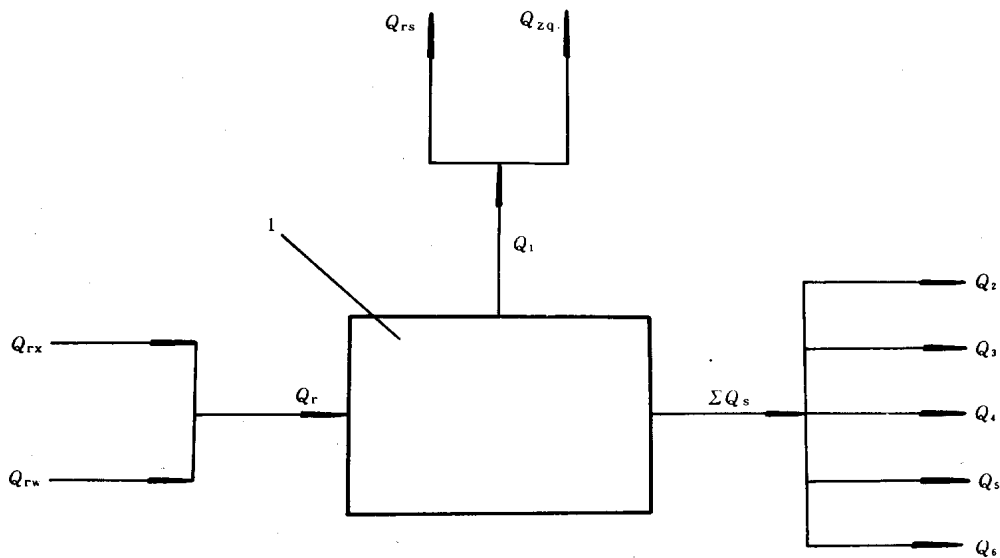


图 1

1—余热锅炉； Q_r —输入热量； Q_{rx} —余热资源的显热； Q_{rw} —可燃物质燃烧后放出的热量； Q_1 —有效输出热量； Q_{rs} —输出热水的有效热量； Q_{zq} —输出蒸汽的有效热量； ΣQ_s —各项损失热量； Q_2 —排烟损失热量； Q_3 —可燃物质化学未燃尽损失热量； Q_4 —可燃物质固体未燃尽损失热量； Q_5 —炉体散热损失热量； Q_6 —其他损失热量

4.2 试验项目

- a. 余热利用率试验；
- b. 出力试验；
- c. 汽水品质试验；
- d. 烟气条件特性试验；
- e. 其他试验，如汽温及其调节范围、排烟温度、烟气流动阻力、漏风等。

4.3 试验条件

- 4.3.1 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。
- 4.3.2 所有受热面在试验开始前均应处于正常的清洁状态。
- 4.3.3 经调整确认余热锅炉主、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。
- 4.3.4 试验前余热锅炉要达到热稳定状态，冷态起动的余热锅炉，热稳定时间规定如下：
 - a. 无炉墙的烟管锅炉，不少于 2 h；
 - b. 轻型炉墙，不少于 8 h；
 - c. 重型炉墙，不少于 24 h。
- 4.3.5 试验期间余热锅炉不得排污，不得吹灰。
- 4.3.6 正式试验前应作一次预备性试验。
- 4.4 试验所用的仪器仪表应符合要求，使用前应经过标定或校验合格。
- 4.5 试验大纲
 - 4.5.1 试验前，试验负责人应按试验任务和要求，根据本标准结合具体情况，拟订试验大纲。
 - 4.5.2 试验大纲内容应包括：试验的目的要求、试验条件、试验项目、测试方法、测量项目、测点布置（含图）、人员分工、试验进度和试验数据处理原则等。
 - 4.5.3 试验大纲应经试验各方认可。
 - 4.5.4 试验前试验负责人应向参加试验人员介绍试验大纲。严格按试验大纲试验。

4.6 试验过程中余热锅炉蒸汽参数允许波动范围

4.6.1 蒸汽压力: +4% ~ -10%。

4.6.2 过热蒸汽温度:

≤300℃时 $\begin{matrix} +30^{\circ}\text{C} \\ -20^{\circ}\text{C} \end{matrix}$

350℃时 $\pm 20^{\circ}\text{C}$

400℃时 $\begin{matrix} +10^{\circ}\text{C} \\ -20^{\circ}\text{C} \end{matrix}$

450℃时 $\begin{matrix} +10^{\circ}\text{C} \\ -15^{\circ}\text{C} \end{matrix}$

4.7 蒸汽(或热水)流量在试验中实测。

4.8 试验时间和试验次数

4.8.1 余热资源为连续稳定时,试验持续时间每次不少于4 h。

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

4.8.3 试验应不少于两次,数据取其平均值。

4.9 测量时间间隔

4.9.1 蒸汽温度、压力、流量:10~15 min 一次。

4.9.2 烟气分析:15~20 min 一次。

4.9.3 动压测量:一般15~20 min 一次;被测管径较大、测点较多时,时间可适当延长。

4.9.4 其他一般为15 min 一次。

4.10 预备性试验

4.10.1 预备性试验目的为:检查测试装置和仪器、检查协调试验观测人员,发现问题及时排除。

4.10.2 预备性试验经各方认可、对试验数据无异议时,可转入正式试验。

4.11 试验结果的允许偏差

4.11.1 余热资源连续稳定的余热锅炉,两次试验误差不大于5%。

4.11.2 余热资源为周期性的余热锅炉,两次试验误差不大于6%。

4.11.3 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误差。

5 计算公式

5.1 余热锅炉热平衡按式(1)或式(2)计算:

$$Q_r = Q_1 + \Sigma Q_s \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$Q_{rx} + Q_{rw} = Q_{rs} + Q_{zq} + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 \quad \dots\dots\dots (2)$$

式中: Q_r ——输入热量, kJ/h;

Q_{rx} ——余热资源的显热, kJ/h;

Q_{rw} ——可燃物质燃烧后放出的热量, kJ/h;

Q_1 ——有效输出热量, kJ/h;

Q_{rs} ——输出热水的有效热量, kJ/h;

Q_{zq} ——输出蒸汽的有效热量, kJ/h;

ΣQ_s ——各项损失热量之和, kJ/h;

Q_2 ——排烟损失热量, kJ/h;

Q_3 ——可燃物质化学未燃尽损失热量, kJ/h;

Q_4 ——可燃物质固体未燃尽损失热量, kJ/h;

Q_5 ——炉体散热损失热量, 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, kJ/h。

5.2 余热利用率按式(3)或式(4)计算:

$$\zeta = \frac{Q_1}{Q_r} \times 100 \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\zeta = 100 - q_2 - q_3 - q_4 - q_5 - q_6 \quad \dots\dots\dots (4)$$

式中: ζ ——余热利用率, %;

Q_1 ——有效输出热量, kJ/h;

Q_r ——输入热量, kJ/h;

q_2 ——排烟热损失, %, 按式(5)计算:

$$q_2 = \frac{Q_2}{Q_r} \times 100 \quad \dots\dots\dots (5)$$

Q_2 ——排烟损失热量, kJ/h;

Q_3 ——可燃物质化学未燃尽热损失, %, 按式(6)计算:

$$q_3 = \frac{Q_3}{Q_r} \times 100 \quad \dots\dots\dots (6)$$

Q_3 ——可燃物质化学未燃尽损失热量, kJ/h;

q_4 ——可燃物质固体未燃尽热损失, %, 按式(7)计算:

$$q_4 = \frac{Q_4}{Q_r} \times 100 \quad \dots\dots\dots (7)$$

Q_4 ——可燃物质固体未燃尽损失热量, kJ/h;

q_5 ——炉体散热损失, %, 按式(8)计算:

$$q_5 = \frac{Q_5}{Q_r} \times 100 \quad \dots\dots\dots (8)$$

Q_5 ——炉体散热损失热量, kJ/h;

q_6 ——其他热损失, %, 按式(9)计算:

$$q_6 = \frac{Q_6}{Q_r} \times 100 \quad \dots\dots\dots (9)$$

Q_6 ——其他损失热量, kJ/h。

5.3 有效输出热量的计算公式

5.3.1 有效输出热量为蒸汽的余热锅炉

a. 带有蒸汽过热器的余热锅炉的有效输出热量按式(10)计算:

$$Q_1 = (D(i_{gq} - i_{gs})) \dots\dots\dots (10)$$

式中: Q_1 ——有效输出热量, kJ/h; D ——过热蒸汽流量, kJ/h; i_{gq} ——过热蒸汽热焓, kJ/kg; i_{gs} ——给水热焓, kJ/kg。

b. 饱和蒸汽余热锅炉的有效输出热量按式(11)计算:

$$Q_1 = D_b(i_{bq} - i_{gs} - \frac{r\omega}{100}) \dots\dots\dots (11)$$

式中: Q_1 ——有效输出热量, kJ/h; D_b ——饱和蒸汽流量, kJ/h; i_{bq} ——饱和蒸汽热焓, kJ/kg; i_{gs} ——给水热焓, kJ/kg; r ——炉水的汽化潜热, kJ/kg; ω ——饱和蒸汽湿度, %。

5.3.2 有效输出热量为热水的余热锅炉的有效输出热量按式(12)计算:

$$Q_1 = G(i_{cs} - i_{js}) \dots\dots\dots (12)$$

式中: Q_1 ——有效输出热量, kJ/h; G ——热水流量, kJ/h; i_{cs} ——出水热焓, kJ/kg; i_{js} ——进水热焓, kJ/kg。

5.4 输入热量按式(13)计算:

$$Q_r = Q_{rx} + Q_{rw} \dots\dots\dots (13)$$

式中: Q_r ——输入热量, kJ/h; Q_{rx} ——余热资源的显热, kJ/h; Q_{rw} ——可燃物质燃烧后放出的热量, kJ/h。

5.4.1 对气体余热资源的输入热量按式(14)计算:

$$Q_r = V[C_r(t_r - t_k) + Q_{aw}'] \dots\dots\dots (14)$$

式中: Q_r ——输入热量, kJ/h; V ——气体体积, m^3/h ; C_r ——余热资源的比热, $kJ/(m^3 \cdot ^\circ C)$;

t_r ——余热资源的温度,℃;

t_k ——环境温度,℃;

Q_{aw}^y ——可燃物质的低位发热量, kJ/m^3 ,按式(15)计算:

$$Q_{aw}^y = \frac{1}{100}(12\,636\text{CO} + 10\,785\text{H}_2 + \dots) \quad \dots\dots\dots(15)$$

CO——余热资源中CO含量,%;

H_2 ——余热资源中 H_2 含量,%。

5.4.2 对液体或固体余热资源的输入热量按式(16)计算:

$$Q_r = B[C_r(t_r - t_k) + Q_{dw}^y] \quad \dots\dots\dots(16)$$

式中: Q_r ——输入热量, kJ/h ;

B ——液体或固体余热资源的重量, kJ/h ;

C_r ——余热资源的比热, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$;

t_r ——余热资源的温度,℃;

t_k ——环境温度,℃;

Q_{dw}^y ——可燃物质的应用基低位发热量, kJ/kg 。

5.5 各项热损失的计算公式

5.5.1 排烟损失热量按式(17)计算:

$$Q_2 = C_{yc} V_{yc} (t_{yc} - t_k) \quad \dots\dots\dots(17)$$

式中: Q_2 ——排烟损失热量, kJ/h ;

C_{yc} ——排烟平均定压比热, $\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$;

V_{yc} ——排烟体积, m^3/h ;

t_{yc} ——余热锅炉出口烟气温度,℃;

t_k ——环境温度,℃。

5.5.2 可燃物质化学未燃尽热损失热量按式(18)计算:

$$Q_3 = 126.36\text{CO}^g V_{yc}^g \quad \dots\dots\dots(18)$$

式中: Q_3 ——烟气中可燃物质化学未燃尽损失热量, kJ/h ;

CO^g ——干烟气中CO体积百分数,%;

V_{yc}^g ——干烟气体积, m^3/h 。

5.5.3 可燃物质固体未燃尽损失热量按式(19)计算:

$$Q_4 = 3.278 \times 10^{-2} \mu_c V_{yc} \quad \dots\dots\dots(19)$$

式中: Q_4 ——烟气中可燃物质固体未燃尽损失热量, kJ/h ;

μ_c ——烟气中含碳量, mg/m^3 ;

V_{yc} ——烟气体积, m^3/h 。

5.5.4 炉体散热损失热量按式(20)或式(21)计算:

$$Q_5 = A\alpha(t_b - t_k) \quad \dots\dots\dots(20)$$

$$Q_5 = \frac{q_5}{100} Q_r \quad \dots\dots\dots(21)$$

式中: Q_5 ——炉体散热损失热量, kJ/h ;

A ——炉体散热表面积, m^2 ;

α ——自然对流条件下的炉体放热系数, $kJ/(m^2 \cdot h \cdot ^\circ C)$;

t_b ——炉体平均壁面温度, $^\circ C$;

q_5 ——炉体散热损失, %;

Q_r ——输入热量, kJ/h 。

5.5.5 其他损失热量按式(22)计算:

$$Q_6 = C_z \mu_z t_z \quad \dots\dots\dots(22)$$

式中: Q_6 ——其他损失热量, kJ/h ;

C_z ——固体或液体的比热, $kJ/(kg \cdot ^\circ C)$;

μ_z ——固体或液体的重量, kg/h ;

t_z ——固体或液体的温度, $^\circ C$ 。

5.6 烟气体积计算公式

5.6.1 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(23)计算:

$$V_y = 9.6995AW \times \frac{p_d + p_i}{273 + t_y} \quad \dots\dots\dots(23)$$

式中: V_y ——烟气体积, m^3/h ;

A ——烟道截面积, m^2 ;

W ——烟气流动速度, m/s ,按式(24)计算:

$$W = 1.4147K \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}} \quad \dots\dots\dots(24)$$

式中: K ——动压测量管校准系数;

Δp ——烟气平均动压, Pa ,按式(25)计算:

$$\Delta p = \left[\frac{1}{n} (\sqrt{\Delta p_1} + \sqrt{\Delta p_2} + \dots + \sqrt{\Delta p_n}) \right]^2 \quad \dots\dots\dots(25)$$

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, Pa ;

ρ ——烟气工作状态下的密度, kg/m^3 ,按式(26)计算:

$$\rho = 2.6943 \times 10^{-3} \rho_0 \times \frac{p_d + p_i}{273 + t_y} \quad \dots\dots\dots (26)$$

ρ_0 按式(27)计算:

$$\rho_0 = 1.9771 \times \frac{\text{CO}_2}{100} + 1.4291 \times \frac{\text{O}_2}{100} + \dots + 1.2504 \text{N}_2 \quad \dots\dots\dots (27)$$

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, Pa;

p_i ——烟道测速点处静压, Pa;

t_y ——烟气温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

5.6.2 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。

5.6.2.1 当能测量进口烟气体积时,出口烟气体积按式(28)计算:

$$V_{yc} = V_{yi} + V_{qL} \quad \dots\dots\dots (28)$$

式中: V_{yc} ——余热锅炉出口烟气体积, m^3/h ;

V_{yi} ——余热锅炉进口烟气体积, m^3/h ;

V_{qL} ——余热锅炉区间漏入空气量, m^3/h , 按式(29)计算:

$$V_{qL} = \frac{(V_{yi} - V_{\text{H}_2\text{O}_i})(\text{O}_{2c}^{\%} - \text{O}_{2i}^{\%})}{20.657 - 0.984\text{O}_{2c}^{\%}} \quad \dots\dots\dots (29)$$

$V_{\text{H}_2\text{O}_i}$ ——余热锅炉进口烟气中水蒸汽体积含量, m^3/h , 按式(30)计算:

$$V_{\text{H}_2\text{O}_i} = \frac{W_i^y}{100} V_{yi} \quad \dots\dots\dots (30)$$

W_i^y ——余热锅炉进口烟气中水蒸汽体积百分数, %;

$\text{O}_{2c}^{\%}$ ——余热锅炉出口干烟气中 O_2 体积百分数, %;

$\text{O}_{2i}^{\%}$ ——余热锅炉进口干烟气中 O_2 体积百分数, %。

5.6.2.2 当能测量出口烟气体积时,进口烟气体积可按式(31)计算:

$$V_{yi} = V_{yc} - V_{qL} \quad \dots\dots\dots (31)$$

式中: V_{yi} ——余热锅炉进口烟气体积, m^3/h ;

V_{yc} ——余热锅炉出口烟气体积, m^3/h ;

V_{qL} ——余热锅炉区间漏入空气量, m^3/h , 按式(32)计算:

$$V_{qL} = \frac{(V_{yc} - V_{H_2O_c})(O_c^g - O_{2c}^g)}{20.657 - 0.984O_{2j}^g} \quad \dots\dots\dots (32)$$

$V_{H_2O_c}$ ——余热锅炉出口烟气中水蒸汽体积含量, m^3/h , 按式(33)计算:

$$V_{H_2O_c} = \frac{W_c^y}{100} V_{yc} \quad \dots\dots\dots (33)$$

W_c^y ——余热锅炉出口烟气中水蒸汽体积百分数, %;

O_{2c}^g ——余热锅炉出口干烟气中 O_2 体积百分数, %;

O_{2j}^g ——余热锅炉进口干烟气中 O_2 体积百分数, %。

5.6.3 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。

注: m^3 指气体温度为 $0^\circ C$ 、压力为 $1.01325 \times 10^5 Pa$ 的状态下的体积, 此状态称为标准状态。下同。

6 测量仪器和测量装置

6.1 测量蒸汽与给水的压力, 应采用精度不低于 2.5 级的压力表, 也可采用就地安装的压力表, 试验前应经校验合格。

6.2 蒸汽和给水流量的测量

6.2.1 余热锅炉蒸发量(或热水流量)采用测量给水(或进水)流量, 或蒸汽流量法。采用蒸汽流量法测量时, 安全阀不得起跳。测量仪表的精度应不低于 1.5 级。

6.2.2 给水(或进水)流量推荐使用 LW 型涡轮流量变送器测量, 变送器标定精度应不低于 0.5 级。测量装置如图 2 所示。也可采用精度不低于 1.5 级的其他流量计测量。

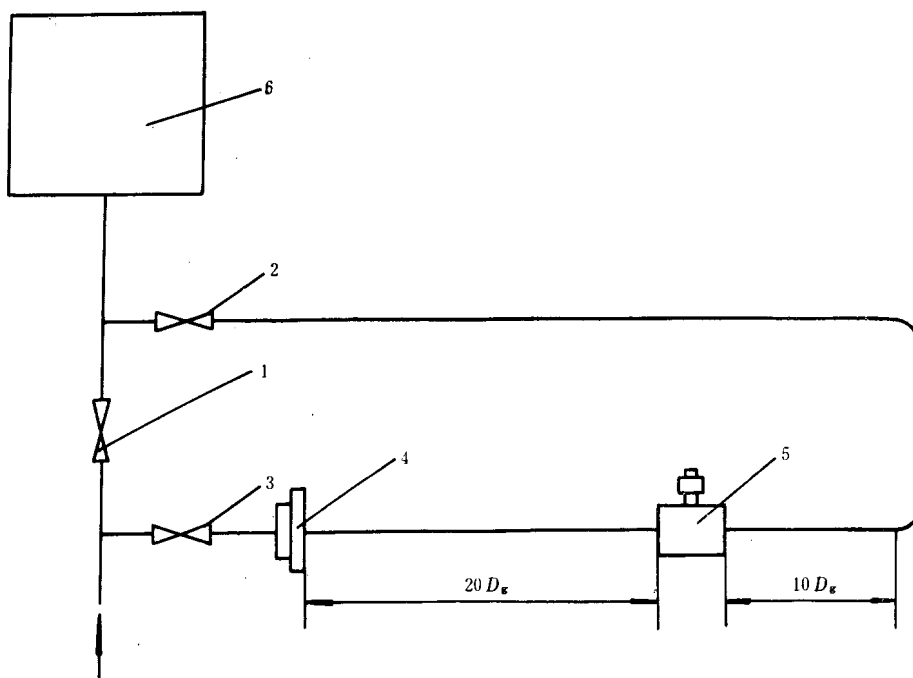


图 2

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_g —给水旁路的公称直径

6.2.3 小容量余热锅炉的给水流量(或进水)也可用水箱体积法测量。

6.2.4 水的体积流量应按式(34)换算为重量流量:

$$G = \frac{V_s}{1\,000\,v} \quad \dots\dots\dots (34)$$

式中: G ——给水(或进水)的重量流量, kg/h;

V_s ——给水(或进水)的体积流量, L/h;

v ——给水(或进水)的比容, m^3/kg 。

6.3 蒸汽品质测量

6.3.1 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量。每次测定时炉水试样和蒸汽试样的温度必须相同。

蒸汽含盐量采用钠离子浓度计测量。

6.3.2 蒸汽与炉水取样点选择

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

6.3.2.2 炉水取样点可选择在水位计下方或锅筒定期排污管处。

6.3.3 蒸汽与炉水取样都必须经过冷却器冷却后进行。

6.3.4 蒸汽取样头

推荐取样头结构如图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(35)规定:

$$n \times \frac{\pi d_1^2}{4} < 0.5 \times \frac{\pi d^2}{4} \quad \dots\dots\dots (35)$$

式中: n ——取样孔数, 一般不小于3;

d_1 ——取样孔孔径, 一般为2~3 mm;

d ——取样管的内径, mm。

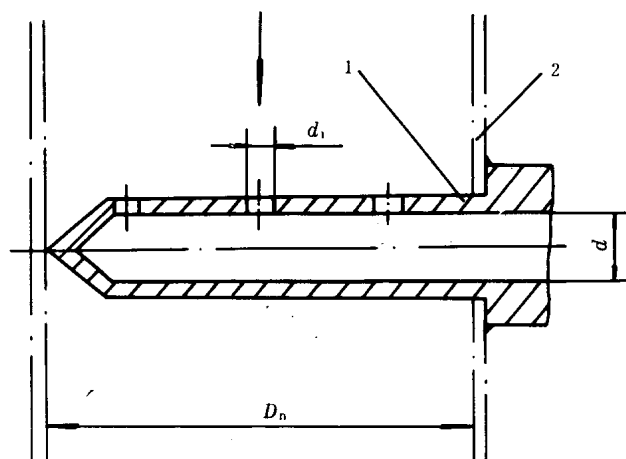


图3

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)

6.3.5 取样量

蒸汽取样应遵循等速取样原则, 即取样量应满足式(36):

$$G_x = nD_G \left(\frac{d_1}{D_n} \right)^2 \dots\dots\dots (36)$$

式中: G_x ——蒸汽取样量, kg/h;

n ——取样孔数;

D_G ——蒸汽管道内的蒸汽流量, kg/h;

d_1 ——取样孔孔径, mm;

D_n ——蒸汽管道的内径, mm。

6.4 温度测量

6.4.1 过热蒸汽温度的测量采用热电偶温度计或热电阻温度计。二次仪表的精度不低于 0.5 级, 热电偶丝直径应不大于 0.5 mm。

6.4.2 余热锅炉进、出水温度测量

6.4.2.1 热水余热锅炉的进、出水温度, 必须使用实验室玻璃温度计测量。

6.4.2.2 蒸汽余热锅炉给水温度可采用普通棒式玻璃温度计测量。

6.4.3 烟气温度采用热电偶温度计测量

6.4.3.1 烟温测点应视烟道大小, 按表 1、表 2 规定布置, 烟气温度取其算术平均值。

6.4.3.2 热电偶头部应裸露于气流中, 且热电偶丝直径应不大于 0.5 mm。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外。

6.4.3.3 二次仪表可用便携式电位差计或精度为 0.5 级的电子电位差计。

6.4.3.4 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。

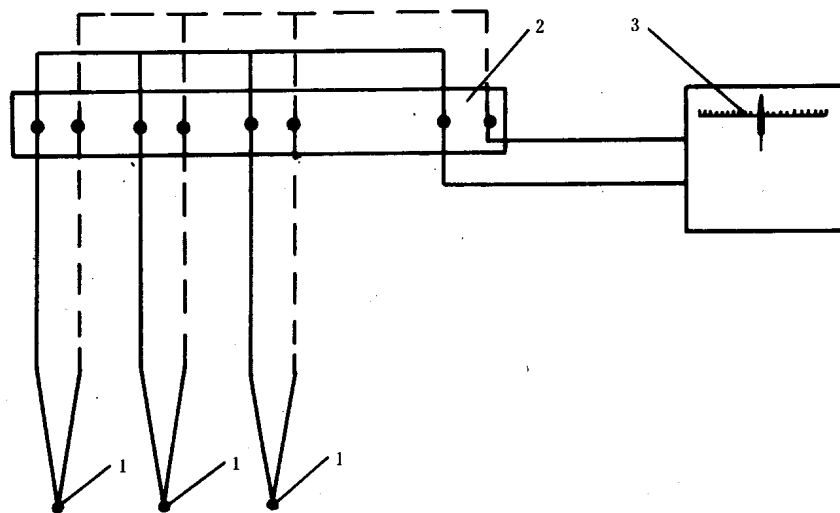


图 4

1—热电偶; 2—接线端子板; 3—二次仪表

6.4.4 余热锅炉炉体壁面温度可采用半导体点温计测量。

6.5 动压测量

6.5.1 当用动压测量管测量动压时, 测量截面前应有 $(4 \sim 7) D_n$ 的直管段, 测量截面后应有 $(1 \sim 2) D_n$ 的直管段, D_n 为管道的内径; 对矩形通道, 以当量直径 D_d 代替 D_n , 当量直径 $D_d = 2AB / (A + B)$, A 及 B 为矩形边长。如不能满足上述要求时, 则应增加测量点数。

6.5.2 测量截面上测点的布置

6.5.2.1 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(37)计算:

$$\left. \begin{aligned} r_1 &= R \sqrt{1/2n} \\ r_3 &= R \sqrt{3/2n} \\ r_5 &= R \sqrt{5/2n} \\ &\dots\dots\dots \\ r_{2n-1} &= R \sqrt{(2n-1)/2n} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (37)$$

式中: $r_1, r_2, r_3, \dots, r_{2n-1}$ ——测点距中心的距离, mm;

R ——烟道半径, mm。

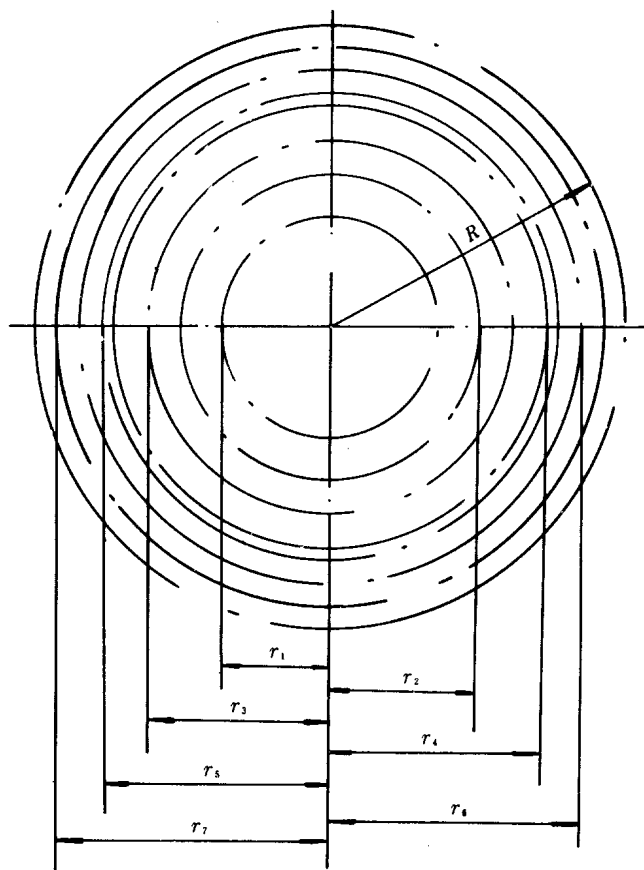


图 5

6.5.2.2 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为动压测量点。

6.5.3 测量点最小数的规定

6.5.3.1 圆形管道等面积环数与布置测点的测量直径数见表 1。当测量直径数为 2 时,该两条直径线应互相垂直。

6.5.3.2 矩形截面的测点排数见表 2。

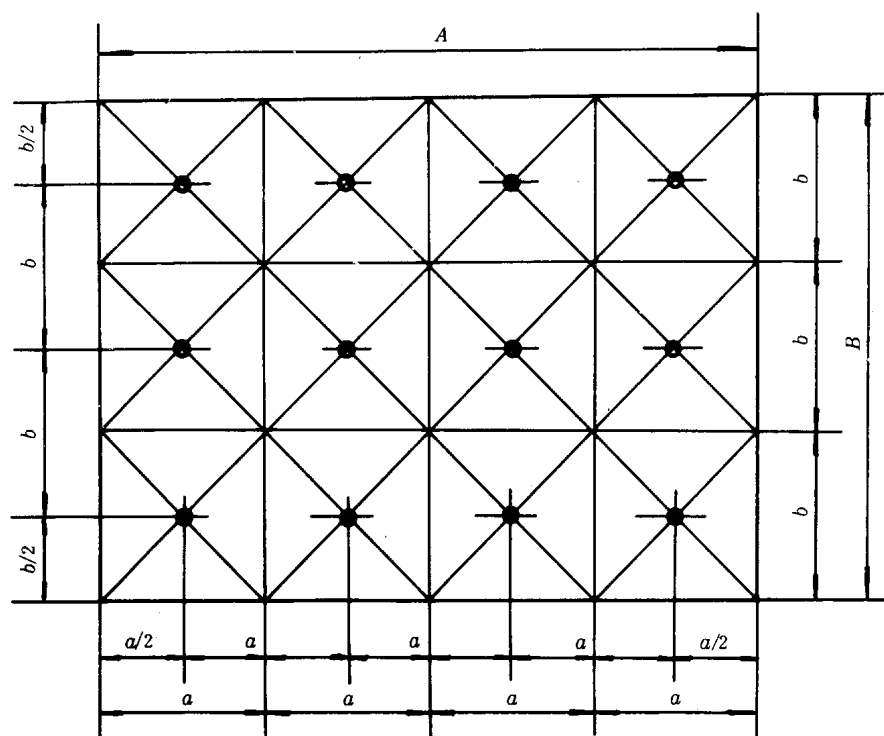


图 6

表 1

| 管道内径 D_n mm | 300 | 400 | 600 | 800 | 1 000 | 1 200 | 1 400 | 1 600 | 1 800 | 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 2

| 矩形管道边长 mm | ≤ 500 | $> 500 \sim 1\,000$ | $> 1\,000 \sim 1\,500$ | $> 1\,500 \sim 2\,000$ | $> 2\,000 \sim 2\,500$ | $> 2\,500$ |
|--------------|------------|---------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------|
| 测点排数 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |

6.5.4 动压测量管

6.5.4.1 干净气体可用标准皮托管测量,标准皮托管见图 7。

6.5.4.2 含尘气体采用图 8 或图 9 所示的动压测量管测量。

6.5.4.3 动压测量管制造后应经校准,确定其校准系数 K 。

6.5.5 测压计

6.5.5.1 烟道静压可采用玻璃 U 型压力计测量。

6.5.5.2 动压测量必须采用精度为 0.5 级的倾斜式微压计。

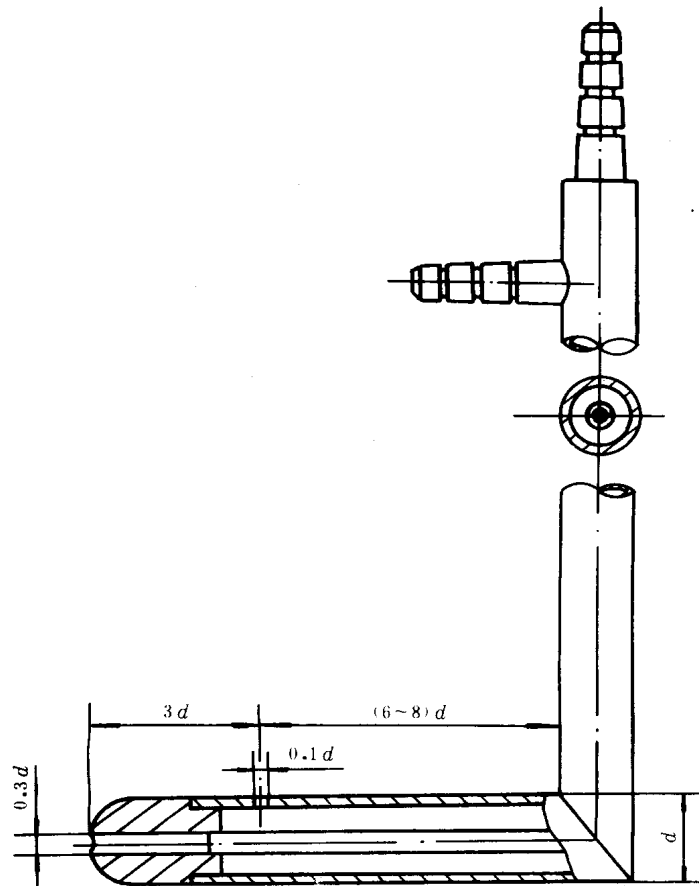


图 7

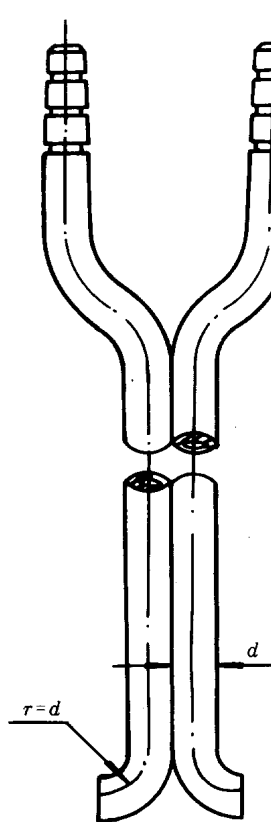


图 8

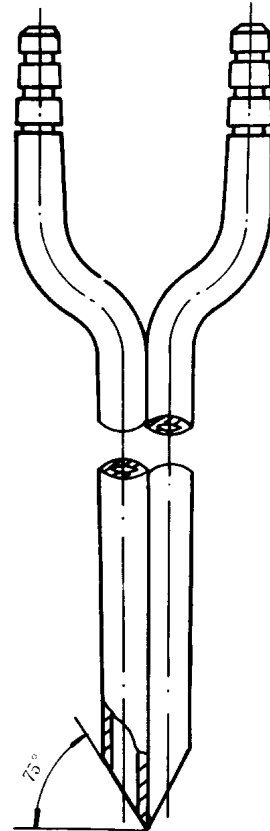


图 9

6.6 气体成分测量

6.6.1 气体取样点应选择在气流均匀的直段上,不应安装在烟道拐弯处及有漏风处。

6.6.2 气体取样管上应按等面积环原则开设若干取样孔,取样孔总面积应符合式(35)。

6.6.3 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至集气容器的管路进行吹扫,且须以饱和食盐水溶液充满三通旋塞到集样器这一段管路。

6.6.4 烟气中 RO_2 、 O_2 、 CO 的测量

烟气中 RO_2 (CO_2 和 SO_2)、 O_2 、 CO 可用奥氏气体分析仪测量,或用其他电分析仪器测量;也可用 CO 比长检测管测定 CO , CO 比长检测管的测定范围见表 3。

表 3

| CO 比长检测管型号 | 一型 | 二型 | 三型 | 四型 |
|------------|--------------|------------|----------|--------|
| 测定范围, % | 0.0005~0.015 | 0.001~0.05 | 0.01~0.5 | 0.5~20 |

6.6.5 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。

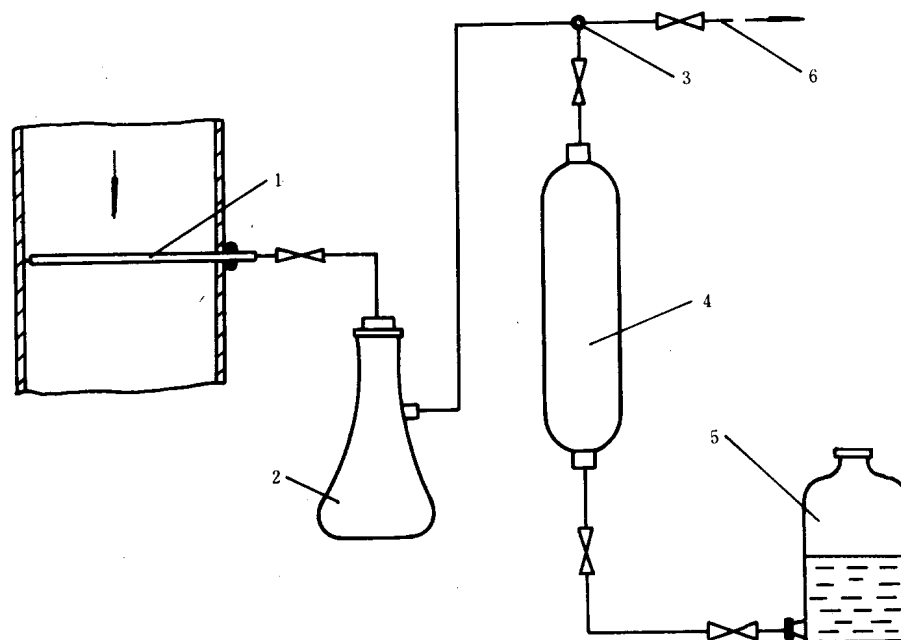


图 10

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

6.7 烟气中水分含量的测定

6.7.1 冷凝法水分含量测定装置如图 11 所示。

烟气中水分含量的体积百分数按式(38)计算:

$$W^y = \frac{460.23(273 + t_q)G_w + p_v V_s}{460.23(273 + t_q)G_w + (p_d + p_q)V_s} \times 100 \quad \dots\dots\dots(38)$$

式中: W^y ——烟气中水分含量的体积百分数, %;

t_q ——流量计前温度计读数, $^{\circ}\text{C}$;

G_w ——冷凝水量, g;

p_v ——由冷凝器后温度查得的饱和压力, Pa;

V_s ——烟气取样量, L;

p_d ——当地大气压, Pa;

p_q ——流量计前压力计读数, Pa。

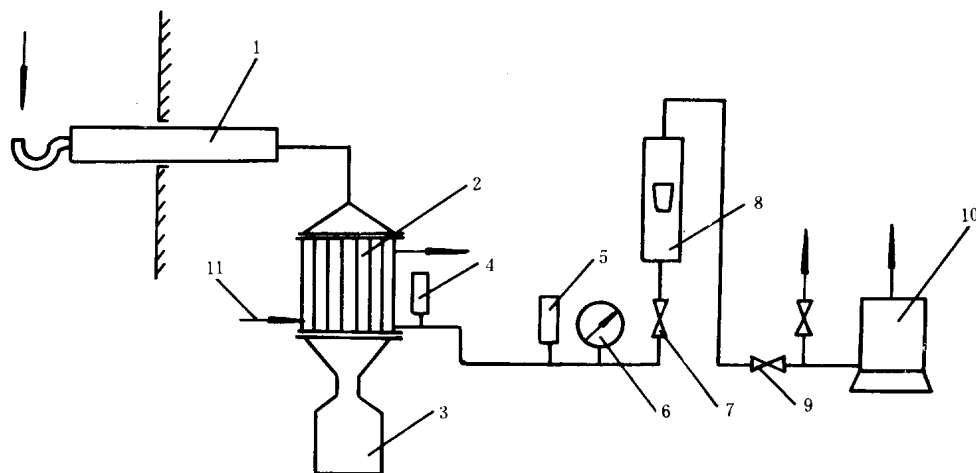


图 11

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

6.7.2 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。烟气中的水蒸汽被吸水剂吸收, 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。

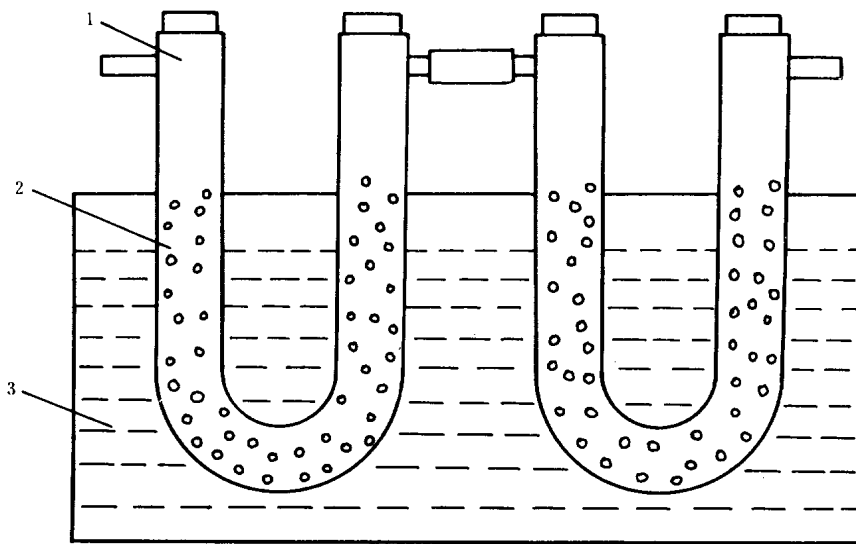


图 12

1—吸水管; 2—吸水剂; 3—冷却器

烟气中水分含量的体积百分数按式(39)计算:

$$W^v = \frac{1.24G_w(273 + t_q)}{2.694 \times 10^{-3}V_s(p_d + p_q) + 1.24G_w(273 + t_q)} \times 100 \quad \dots\dots\dots(39)$$

式中: W^v ——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, g;

V_s ——烟气取样量, L;

t_q ——流量计前烟气温度, °C;

p_q ——流量计前压力计读数, Pa;

p_d ——当地大气压, Pa。

6.7.3 干湿球法水分含量测定装置如图 13 所示。

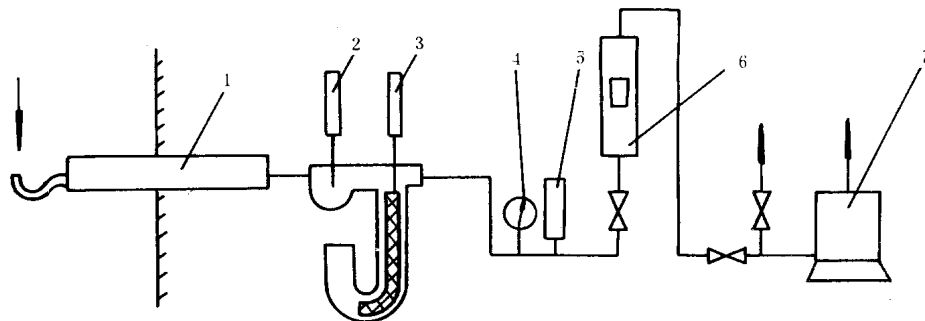


图 13

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

烟气水分含量的体积百分数按式(40)计算:

$$W^y = \frac{p_s}{p_y} \times 100 \quad \dots\dots\dots(40)$$

式中: W^y ——烟气中水分含量的体积百分数, %;

p_s ——烟气中水蒸汽的压力, Pa, 按式(41)计算:

$$p_s = p_{bv} - C(t_g - t_s)p_{sb} \quad \dots\dots\dots(41)$$

p_{bv} ——温度为 t_s 时饱和水蒸汽压力, Pa;

C ——当烟气流过湿球表面积时的流速大于 2.5 m/s 时, C 值约等于 0.000 66;

t_g ——干球温度, °C;

t_s ——湿球温度, °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), Pa;

p_y ——烟道内烟气绝对压力, Pa, 按式(42)计算:

$$p_y = p_d + p_i \quad \dots\dots\dots(42)$$

p_d ——当地大气压, Pa;

p_i ——烟道静压, Pa。

6.8 烟气含尘量测定

烟气中含尘量的测定装置同图 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。

6.8.1 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。

6.8.2 烟气取样应遵循等速取样原则, 详见附录 E(参考件)。

6.8.3 含尘量按式(43)计算:

$$\mu_h = \frac{\mu}{5.0104 \times 10^{-2} V'_{r, t_n} \frac{(p_d + p_q - p_v)}{\sqrt{(p_d + p_q)(273 + t_q)}}} \times 1000 \quad \dots\dots\dots(43)$$

式中: μ_h ——烟气含尘量, mg/m³;

μ ——试验期间的收尘量, mg;

- t_n ——试验采样时间, min;
 V_r' ——流量计读数, L/min;
 t_q ——流量计前温度计读数, °C;
 p_d ——当地大气压, Pa;
 p_q ——流量计前压力计读数, Pa;
 p_v ——流量计前饱和蒸汽压力, Pa。

6.8.4 烟尘中含碳量测定

在烟尘取样后,测得收尘量 μ (mg),经灰化处理后测出其中的含灰量为 μ'_h (mg),烟尘中含碳量按式(44)计算:

$$\mu_c = \frac{\mu - \mu'_h}{5.0104 \times 10^{-2} V_r' t_n \frac{(p_d + p_q - p_v)}{\sqrt{(p_d + p_q)(273 + t_q)}}} \times 1000 \quad \dots\dots\dots (44)$$

式中: μ_c ——烟尘中含碳量, mg/m³;

- μ ——试验期间收尘量, mg;
 μ'_h ——烟尘的含灰量, mg;
 V_r' ——流量计读数, L/min;
 t_n ——试验采样时间, min;
 t_q ——流量计前温度计读数, °C;
 p_v ——流量计前饱和蒸汽压力, Pa;
 p_q ——流量计前压力计读数, Pa;
 p_d ——当地大气压, Pa。

7 试验报告

7.1 试验报告内容应包括:

- a. 简要说明试验目的、要求和试验内容;
- b. 测点布置和测试仪器说明;
- c. 试验结论;
- d. 余热锅炉设计数据和试验数据综合计算表〔见附录 A(补充件)〕。

7.2 试验报告型式

7.2.1 封面 内容:上方书写_____型余热锅炉热工试验报告;下方书写测试单位名称与出具报告年月日。

7.2.2 扉页 内容:

- a. 余热锅炉型号;
- b. 余热锅炉设计单位;
- c. 余热锅炉制造厂;
- d. 余热锅炉编号;
- e. 试验地点;
- f. 试验日期;
- g. 试验单位;
- h. 试验负责人;
- i. 参加试验人员。

附 录 A
设计数据和试验数据综合计算表
(补充件)

A1 余热锅炉设计数据表

余热锅炉设计数据表见表 A1。

表 A1

| 序号 | 名 称 | 符号 | 设计数据 | 单 位 |
|----|----------------|-----------------|------|---------------------|
| 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_{gq} | | ℃ |
| 4 | 给水温度 | t_{gs} | | ℃ |
| 5 | 热水炉循环水量 | G | | kg/h |
| 6 | 热水炉进水压力 | p_p | | MPa |
| 7 | 热水炉进水温度 | t_{js} | | ℃ |
| 8 | 热水炉出水压力 | p_{cs} | | MPa |
| 9 | 热水炉出水温度 | t_{cs} | | ℃ |
| 10 | 余热锅炉出口烟气温度 | t_{yc} | | ℃ |
| 11 | 余热锅炉受热面积 | F_g | | m ² |
| 12 | 辐射受热面积 | F_f | | m ² |
| 13 | 过热器受热面积 | F_{gq} | | m ² |
| 14 | 省煤器受热面积 | F_{sm} | | m ² |
| 15 | 空气预热器受热面积 | F_{kq} | | m ² |
| 16 | 气体量 | V | | m ³ */h |
| 17 | 余热资源温度 | t_r | | ℃ |
| 18 | 气体压力 | p_r | | Pa |
| 19 | 气体成分 | | | |
| | 二氧化碳 | CO ₂ | | % |
| | 二氧化硫 | SO ₂ | | % |
| | 一氧化碳 | CO | | % |
| | 氢 | H ₂ | | % |
| | 甲烷 | CH ₄ | | % |
| | 氮 | N ₂ | | % |
| | 氧 | O ₂ | | % |
| | 水蒸汽 | W ^v | | % |
| | | | | |
| 20 | 含尘量 | μ_h | | g/m ³ * |
| 21 | 干燥质低位发热量 | Q_{dw}^g | | kJ/m ³ * |
| 22 | 液体(固体)可燃物质元素成分 | | | |

续表 A1

| 序号 | 名 称 | 符号 | 设计数据 | 单 位 |
|----|--------------|-----------------|------|-------|
| | 碳 | C | | % |
| | 氢 | H | | % |
| | 氧 | O | | % |
| | 硫 | S | | % |
| | 氮 | N | | % |
| | 灰 | A | | % |
| | 水分 | W | | % |
| 23 | 应用基低位发热量 | Q_{dw} | | kJ/kg |
| 24 | 液体(固体)余热资源重量 | B | | kg/h |

A2 试验数据综合计算表

试验数据综合计算表见表 A2。

表 A2

| 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_s | L/h | 实测 | | |
| 2 | 给水压力 | p_{gs} | MPa | 实测 | | |
| 3 | 给水温度 | t_{gs} | ℃ | 实测 | | |
| 4 | 水的比容 | ν | m ³ /kg | 查水性质表 | | |
| 5 | 余热锅炉蒸发量 | D | kg/h | $D = G_s \times \frac{1}{1\,000\,\nu}$ | | |
| 6 | 热水炉热水体积流量 | G_s | L/h | 实测 | | |
| 7 | 热水炉进水温度 | t_{js} | ℃ | 实测 | | |
| 8 | 热水炉进水压力 | p_{js} | MPa | 实测 | | |
| 9 | 热水炉进水比容 | ν | m ³ /kg | 查水性质表 | | |
| 10 | 热水炉热水流量 | G | kg/h | $G = G_s \times \frac{1}{1\,000\,\nu}$ | | |
| 11 | 余热锅炉出口蒸汽压力 | p | MPa | 实测 | | |
| 12 | 过热蒸汽温度 | t_{gq} | ℃ | 实测 | | |
| 13 | 饱和蒸汽热焓 | i_{bq} | kJ/kg | 查干饱和蒸汽性质表 | | |
| 14 | 过热蒸汽热焓 | i_{gq} | kJ/kg | 查过热蒸汽性质表 | | |
| 15 | 蒸汽湿度 | ω | % | 实测 | | |
| 16 | 过热蒸汽含盐量 | S_{gq} | mg/kg | 实测 | | |
| 17 | 汽化潜热 | γ | kJ/kg | 查干饱和蒸汽性质表 | | |
| 18 | 给水热焓 | i_{gs} | kJ/kg | 查水性质表 | | |
| 19 | 热水炉进水热焓 | i_{js} | kJ/kg | 查水性质表 | | |
| 20 | 热水炉出水压力 | p_{cs} | MPa | 实测 | | |
| 21 | 热水炉出水温度 | t_{cs} | ℃ | 实测 | | |
| 22 | 热水炉出水热焓 | i_{cs} | kJ/kg | 查水性质表 | | |

续表 A2

| 序号 | 测量或计算项目 | 符号 | 单位 | 数据来源 | 试验数据 | |
|----|---------------------------|-------------------|--------------------------|--|------|---|
| | | | | | 1 | 2 |
| 23 | 有效输出热量 | | | | | |
| | 带蒸汽过热器的余热锅炉 | Q_1 | kJ/h | $D(i_{gq} - i_{gs})$ | | |
| | 饱和蒸汽余热锅炉 | Q_1 | kJ/h | $D(i_{bq} - i_{gs} - \frac{\gamma\omega}{100})$ | | |
| | 热水余热锅炉 | Q_1 | kJ/h | $G(i_{cs} - i_{ps})$ | | |
| 24 | 余热锅炉进口气体温度 | t_r | ℃ | 实测 | | |
| 25 | 进口干气体中 CO ₂ 含量 | CO _{2j} | % | 实测 | | |
| 26 | 进口干气体中 O ₂ 含量 | O _{2j} | % | 实测 | | |
| 27 | 进口干气体中 CO 含量 | CO _j | % | 实测 | | |
| 28 | 进口干气体中 SO ₂ 含量 | SO _{2j} | % | 实测 | | |
| 29 | 进口干气体中 CH ₄ 含量 | CH _{4j} | % | 实测 | | |
| 30 | 进口干气体中 H ₂ 含量 | H _{2j} | % | 实测 | | |
| 31 | 进口干气体中 N ₂ 含量 | N _{2j} | % | $100 - (CO_{2j} + O_{2j} + \dots + H_{2j})$ | | |
| 32 | 进口气体中 H ₂ O 含量 | W _j | % | 实测 | | |
| 33 | 进口气体中 CO ₂ 含量 | CO _{2j} | % | $CO_{2j} \times \frac{100 - W_j}{100}$ | | |
| 34 | 进口气体中 O ₂ 含量 | O _{2j} | % | $O_{2j} \times \frac{100 - W_j}{100}$ | | |
| 35 | 进口气体中 CO 含量 | CO _j | % | $CO_j \times \frac{100 - W_j}{100}$ | | |
| 36 | 进口气体中 SO ₂ 含量 | SO _{2j} | % | $SO_{2j} \times \frac{100 - W_j}{100}$ | | |
| 37 | 进口气体中 CH ₄ 含量 | CH _{4j} | % | $CH_{4j} \times \frac{100 - W_j}{100}$ | | |
| 38 | 进口气体中 H ₂ 含量 | H _{2j} | % | $H_{2j} \times \frac{100 - W_j}{100}$ | | |
| 39 | 进口气体中 N ₂ 含量 | N _{2j} | % | $N_{2j} \times \frac{100 - W_j}{100}$ | | |
| 40 | 进口气体含尘量 | μ_{hj} | g/m ³ | 实测 | | |
| 41 | 进口气体中 CO ₂ 比热 | C _{CO2j} | kJ/(m ³ · °C) | 查表 | | |
| 42 | 进口气体中 O ₂ 比热 | C _{O2j} | kJ/(m ³ · °C) | 查表 | | |
| 43 | 进口气体中 CO 比热 | C _{COj} | kJ/(m ³ · °C) | 查表 | | |
| 44 | 进口气体中 SO ₂ 比热 | C _{SO2j} | kJ/(m ³ · °C) | 查表 | | |
| 45 | 进口气体中 CH ₄ 比热 | C _{CH4j} | kJ/(m ³ · °C) | 查表 | | |
| 46 | 进口气体中 H ₂ 比热 | C _{H2j} | kJ/(m ³ · °C) | 查表 | | |
| 47 | 进口气体中 N ₂ 比热 | C _{N2j} | kJ/(m ³ · °C) | 查表 | | |
| 48 | 进口气体中尘的比热 | C _{phj} | kJ/(kg · °C) | 查表 | | |
| 49 | 进口气体余热资源比热 | C _r | kJ/(m ³ · °C) | $\frac{1}{100} (C_{CO2j} CO_{2j} + \dots + \frac{\mu_{hj}}{1000} C_{phj})$ | | |
| | 液体(固体)余热资源比热 | C _r | kJ/(kg · °C) | 查表或实测 | | |

续表 A2

| 序号 | 测量或计算项目 | 符号 | 单位 | 数据来源 | 试验数据 | |
|----|---------------------------|--------------|-----------------------------|--|------|---|
| | | | | | 1 | 2 |
| 50 | 进口气体动压 | Δp_i | Pa | $\left[\frac{1}{n} (\sqrt{\Delta p_1} + \sqrt{\Delta p_2} + \dots + \sqrt{\Delta p_n}) \right]^2$ | | |
| 51 | 当地大气压 | p_d | Pa | 实测或查表 | | |
| 52 | 进口气体静压 | p_{ji} | Pa | 实测 | | |
| 53 | 动压测量管校准系数 | K | | 实测 | | |
| 54 | 标准状态下进口气体密度 | ρ_{oi} | kg/m ³ * | $1.9771 \frac{CO_{2j}}{100} + 1.4291 \frac{O_{2j}}{100} + 1.2504 \frac{N_{2j}}{100}$ $+ 1.2506 \frac{CO_j}{100} + 2.9263 \frac{SO_{2j}}{100} + \dots + \frac{\mu_{hj}}{1\ 000}$ | | |
| 55 | 工作状态下进口气体密度 | ρ_i | kg/m ³ | $2.6943 \times 10^{-3} \cdot \rho_{oi} \frac{p_d + p_{ji}}{273 + t_r}$ | | |
| 56 | 进口气体平均流速 | W_{yi} | m/s | $1.4147K \sqrt{\Delta p_i / \rho_i}$ | | |
| 57 | 进口烟道截面积 | A_i | m ² | 实测 | | |
| 58 | 进口气体流量 | V_i | m ³ /h | $9.6995 A_i W_{yi} \frac{p_d + p_{ji}}{273 + t_r}$ | | |
| 59 | 液体(固体)余热资源重量 | B | kg/h | 实测 | | |
| 60 | 环境温度 | t_k | ℃ | 实测 | | |
| 61 | 余热资源显热 | Q_{rx} | kJ/h | $V_i C_r (t_r - t_k)$ 或 $BC_r (t_r - t_k)$ | | |
| 62 | 余热资源的应用基低位发热量 | Q_{dw}^y | kJ/m ³ * 或 kJ/kg | $\frac{1}{100} (12636CO + 10785H_2$ $+ \dots) \text{或实测数据}$ | | |
| 63 | 输入热量 | Q_r | kJ/h | $V_i [C_r (t_r - t_k) + Q_{dw}^y]$ 或 $B [C_r (t_r - t_k) + Q_{dw}^y]$ | | |
| 64 | 余热锅炉出口烟气温度 | t_{yc} | ℃ | 实测 | | |
| 65 | 出口干烟气中 CO ₂ 含量 | CO_{2c}^y | % | 实测 | | |
| 66 | 出口干烟气中 O ₂ 含量 | O_{2c}^y | % | 实测 | | |
| 67 | 出口干烟气中 CO 含量 | CO_c^y | % | 实测 | | |
| 68 | 出口干烟气中 SO ₂ 含量 | SO_{2c}^y | % | 实测 | | |
| 69 | 出口干烟气中 N ₂ 含量 | N_{2c}^y | % | $100 - (CO_{2c}^y + O_{2c}^y + \dots)$ | | |
| 70 | 出口烟气中 H ₂ O 含量 | W_c^y | % | 实测 | | |
| 71 | 出口烟气中含尘量 | μ_{hc} | g/m ³ * | 实测 | | |
| 72 | 出口烟气中 CO ₂ 含量 | CO_{2c} | % | $CO_{2c}^y \times \frac{100 - W_c^y}{100}$ | | |
| 73 | 出口烟气中 O ₂ 含量 | O_{2c} | % | $O_{2c}^y \times \frac{100 - W_c^y}{100}$ | | |
| 74 | 出口烟气中 CO 含量 | CO_c | % | $CO_{2c}^y \times \frac{100 - W_c^y}{100}$ | | |
| 75 | 出口烟气中 SO ₂ 含量 | SO_{2c} | % | $SO_{2c}^y \times \frac{100 - W_c^y}{100}$ | | |

续表 A2

| 序号 | 测量或计算项目 | 符号 | 单位 | 数据来源 | 试验数据 | |
|-------|---------------------------|---|--------------------------|--|------|---|
| | | | | | 1 | 2 |
| | | | | | | |
| 76 | 出口烟气中 N ₂ 含量 | N _{2c} | % | $N_{2c} \times \frac{100 - W_c^*}{100}$ | | |
| 77 | 出口烟气中 H ₂ O 比热 | C _{H₂O_c} | kJ/(m ³ · °C) | 查表 | | |
| 78 | 出口烟气中 CO ₂ 比热 | C _{CO₂c} | kJ/(m ³ · °C) | 查表 | | |
| 79 | 出口烟气中 O ₂ 比热 | C _{O₂c} | kJ/(m ³ · °C) | 查表 | | |
| 80 | 出口烟气中 CO 比热 | C _{COc} | kJ/(m ³ · °C) | 查表 | | |
| 81 | 出口烟气中 SO ₂ 比热 | C _{SO₂c} | kJ/(m ³ · °C) | 查表 | | |
| | | | | | | |
| 82 | 出口烟气中 N ₂ 比热 | C _{N₂c} | kJ/(m ³ · °C) | 查表 | | |
| 83 | 出口烟气中尘的比热 | C _{phc} | kJ/(kg · °C) | 查表 | | |
| 84 | 出口烟气比热 | C _{yc} | kJ/(m ³ · °C) | $\frac{1}{100} (C_{co2c} CO_{2c} + \dots + \frac{\mu_{hc}}{1\ 000} C_{phc})$ | | |
| 85 | 出口烟气动压 | Δp _c | Pa | $[\frac{1}{n} (\sqrt{\Delta p_1} + \sqrt{\Delta p_2} + \dots + \sqrt{\Delta p_n})]^2$ | | |
| 86 | 出口烟道静压 | p _{jc} | Pa | 实测 | | |
| 87 | 标准状态下出口烟气密度 | ρ _{oc} | kg/m ³ | $1.9771 \frac{CO_{2c}}{100} + 1.4291 \frac{O_{2c}}{100} + \dots + \frac{\mu_{hc}}{1\ 000}$ | | |
| 88 | 工作状态下出口烟气密度 | ρ _c | kg/m ³ | $2.6943 \times 10^{-3} \rho_{oc} \frac{p_d + p_k}{273 + t_{yc}}$ | | |
| 89 | 出口烟气平均流速 | W _{yc} | m/s | $1.4147K \sqrt{\Delta p_c / \rho_c}$ | | |
| 90 | 出口烟道截面积 | A _c | m ² | 实测 | | |
| 91 | 出口烟气流量 | V _{yc} | m ³ / h | $9.6995 A_c W_{yc} \frac{p_d + p_k}{273 + t_{yc}}$ | | |
| 92 | 出口烟气显热 | Q _{rx} | kJ/h | V _{yc} C _{yc} (t _{yc} - t _k) | | |
| 93 | 余热锅炉出口烟气水蒸汽体积含量 | V _{H₂O_c} | m ³ / h | $\frac{W_c^*}{100} V_{yc}$ | | |
| 94 | 余热锅炉区间漏风量 | V _{ql} | m ³ / h | $\frac{(V_{yc} - V_{H_2O_c})(O_{2c}^* - O_{2l}^*)}{20.657 - 0.984 O_{2l}^*}$ | | |
| 95 | 余热锅炉进口气体量 | V _{yi} | m ³ / h | V _{yc} - V _{ql} | | |
| 96 | 出口干烟气量 | V _{yc} [*] | m ³ / h | $V_{yc} \frac{(100 - W_c^*)}{100}$ | | |
| 97 | 余热锅炉排烟热损失 | q ₂ | % | $\frac{Q_{rx}}{Q_r} \times 100$ | | |
| 98 | 余热锅炉可燃物质化学未燃尽热损失 | q ₃ | % | $\frac{126.36 V_{yc} CO_c^*}{Q_r} \times 100$ | | |
| 99 | 余热锅炉可燃物质固体未燃尽热损失 | q ₄ | % | $\frac{3.278 \times 10^{-2} \mu_c V_{yc}}{Q_r} \times 100$ | | |

续表 A2

| 序号 | 测量或计算项目 | 符号 | 单位 | 数据来源 | 试验数据 | |
|-----|----------------|-----------|--|--|------|---|
| | | | | | 1 | 2 |
| 100 | 余热锅炉炉体散热损失 | q_5 | % | 查表或实测计算 | | |
| 101 | 排出的液态(固态)物质的比热 | C_s | $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ | 查表 | | |
| 102 | 排出的液态(固态)物质的重量 | μ_s | kg/h | 实测 | | |
| 103 | 排出的液态(固态)物质的温度 | t_s | $^\circ\text{C}$ | 实测 | | |
| 104 | 其他损失热量 | q_6 | % | $\frac{C_s \mu_s t_s}{Q_r} \times 100$ | | |
| 105 | 余热利用率 | ζ | % | $\frac{Q_1}{Q_r} \times 100$ | | |
| | | | | 或 $100 - q_2 - q_3 - q_4 - q_5 - q_6$ | | |
| | 平均余热利用率 | ζ_p | % | $(\zeta_1 + \zeta_2)/2$ | | |

附 录 B
气体的密度与发热量
(参考件)

B1 气体的密度与发热量见表 B1。表中密度的单位为 kg/m^3 ；发热量的单位为 kJ/m^3 。

表 B1

| 名称 | 分子式 | 分子量 | 密度, kg/m^3 * | | 压缩系数 | 低位发热量 kJ/m^3 * |
|------|---------------------------|----------|------------------------------|---------|---------|-----------------------------------|
| | | | 理想密度 | 实际密度 | | |
| 氢 | H_2 | 2.016 0 | 0.089 9 | 0.089 9 | 1.000 6 | 10 785 |
| 一氧化碳 | CO | 28.010 4 | 1.249 7 | 1.250 6 | 0.999 3 | 12 636 |
| 甲烷 | CH_4 | 16.043 0 | 0.715 8 | 0.717 4 | 0.997 7 | 35 881 |
| 乙烷 | C_2H_6 | 30.070 0 | 1.341 6 | 1.355 3 | 0.989 9 | 64 351 |
| 丙烷 | C_3H_8 | 44.097 0 | 1.967 4 | 2.010 2 | 0.978 7 | 93 181 |
| 丁烷 | C_4H_{10} | 58.124 0 | 2.593 2 | 2.691 2 | 0.963 6 | 123 565 |
| 乙烯 | C_2H_4 | 28.054 0 | 1.251 7 | 1.260 5 | 0.993 0 | 59 440 |
| 丙烯 | C_3H_6 | 42.001 0 | 1.877 5 | 1.913 6 | 0.981 1 | 87 609 |
| 丁烯 | C_4H_8 | 56.108 0 | 2.503 3 | 2 596 8 | 0.964 0 | 117 616 |
| 乙炔 | C_2H_2 | 26.040 0 | 1.170 9 | — | — | 56 019 |
| 硫化氢 | H_2S | 34.176 0 | 1.520 3 | 1.536 3 | 0.989 6 | 23 367 |
| 氧 | O_2 | 31.998 8 | 1.427 7 | 1.429 1 | 0.999 1 | — |
| 二氧化碳 | CO_2 | 44.009 8 | 1.963 5 | 1.977 1 | 0.993 2 | — |
| 水蒸汽 | H_2O | 18.015 4 | 0.803 8 | 0.833 0 | 0.965 0 | — |
| 空气 | — | 28.966 0 | 1.292 3 | 1.293 1 | 0.999 4 | — |
| 氮 | N_2 | 28.013 4 | 1.249 8 | 1.250 4 | 0.999 6 | — |
| 二氧化硫 | SO_2 | 26.060 0 | — | 2.926 3 | — | — |
| 三氧化硫 | SO_3 | 80.060 0 | — | 3.577 0 | — | — |

附录 C

常用气体平均定压容积比热

(参考件)

C1 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 C1。表中比热的单位为 $\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$ 。

表 C1

| $t, ^\circ\text{C}$ | CO_2 | N_2 | O_2 | H_2O | 干空气 | 湿空气 ($d=10 \text{ g}/\text{m}^3$) | SO_2 | H_2 | CO | CH_4 |
|---------------------|---------------|--------------|--------------|----------------------|---------|--|---------------|--------------|-------------|---------------|
| 0 | 1.599 8 | 1.294 6 | 1.305 9 | 1.494 3 | 1.297 1 | 1.318 8 | 1.733 3 | 1.276 6 | 1.299 2 | 1.550 0 |
| 100 | 1.700 2 | 1.295 8 | 1.317 6 | 1.505 2 | 1.300 4 | 1.324 3 | 1.812 9 | 1.290 8 | 1.301 7 | 1.642 1 |
| 200 | 1.787 3 | 1.299 6 | 1.335 2 | 1.522 3 | 1.307 1 | 1.331 8 | 1.888 2 | 1.297 1 | 1.307 1 | 1.758 9 |
| 300 | 1.862 7 | 1.306 7 | 1.356 1 | 1.542 4 | 1.317 2 | 1.342 3 | 1.955 2 | 1.299 2 | 1.316 7 | 1.886 2 |
| 400 | 1.929 6 | 1.316 8 | 1.377 5 | 1.565 4 | 1.328 9 | 1.354 4 | 2.108 0 | 1.302 1 | 1.328 9 | 2.015 5 |
| 500 | 1.988 7 | 1.327 6 | 1.398 0 | 1.589 7 | 1.342 7 | 1.368 2 | 2.068 3 | 1.305 0 | 1.342 7 | 2.140 3 |
| 600 | 2.041 1 | 1.340 2 | 1.416 8 | 1.614 8 | 1.356 5 | 1.382 9 | 2.114 3 | 1.308 0 | 1.357 4 | 2.260 9 |
| 700 | 2.088 3 | 1.353 6 | 1.434 4 | 1.641 2 | 1.370 8 | 1.397 6 | 2.152 0 | 1.312 1 | 1.372 0 | 2.376 8 |
| 800 | 2.131 1 | 1.367 0 | 1.449 9 | 1.668 0 | 1.384 2 | 1.411 4 | 2.181 3 | 1.316 7 | 1.386 2 | 2.494 1 |
| 900 | 2.169 2 | 1.379 6 | 1.464 5 | 1.695 7 | 1.397 6 | 1.424 8 | 2.214 8 | 1.322 6 | 1.399 6 | 2.602 5 |
| 1 000 | 2.203 5 | 1.391 7 | 1.477 5 | 1.722 9 | 1.409 7 | 1.437 3 | 2.235 8 | 1.328 9 | 1.412 6 | 2.699 2 |
| 1 100 | 2.234 9 | 1.403 4 | 1.489 2 | 1.750 1 | 1.421 4 | 1.449 9 | 2.260 9 | 1.336 0 | 1.424 8 | 2.736 3 |
| 1 200 | 2.263 8 | 1.414 3 | 1.500 5 | 1.776 9 | 1.432 7 | 1.461 2 | 2.277 6 | 1.343 1 | 1.436 1 | 2.862 9 |
| 1 300 | 2.289 8 | 1.425 2 | 1.510 6 | 1.802 8 | 1.443 2 | 1.472 5 | 2.298 6 | — | 1.446 5 | — |

附录 D

氯离子滴定法化学试剂配制和蒸汽湿度的测定

(参考件)

D1 溶液配制

D1.1 10%铬酸钾指示剂

称取 10 g 铬酸钾($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$)溶于少量蒸馏水中并稀释至 100 mL。滴加硝酸银标准溶液至出现橙色,放置,过滤后备用。

D1.2 酚酞指示剂

称取酚酞 1 g,溶于 100 mL 乙醇溶液中。

D1.3 0.1 N 硫酸标准溶液

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

D1.4 0.1 N 硝酸银标准溶液

称取分析纯硝酸银(分子量为 166.86)17 g 放在烧杯中,再加入蒸馏水 1 L,溶解后倾入褐色瓶中。

以备标定。可根据测定要求稀释至 0.01 N 或 0.001 N。

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 450~500℃灼热约 2~2.5 h,取出置于干燥器中冷却后,精确称取 0.15 g 氯化钾,置于三角烧瓶中,加蒸馏水 70 mL,用欲标定的硝酸银溶液滴定至快到终点时(尚缺加硝酸银 1~2 mL 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 按下式计算：

$$N = \frac{\text{氯化钾重(g)}}{\text{氯化钾毫克当量值}(0.07456) \times \text{硝酸银消耗量(mL)}}$$

D2 氯离子滴定

D2.1 蒸汽凝结水取样量 100 mL。

D2.2 用移液管量取炉水试样 10 mL,并用蒸馏水稀释至 100 mL。

D2.3 将两试样分别注入两只 250 mL 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 0.1 N 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 0.01 N 或 0.001 N 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含量的比值。

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

附录 E

烟尘的等速取样方法

(参考件)

E1 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 E1C 所示。

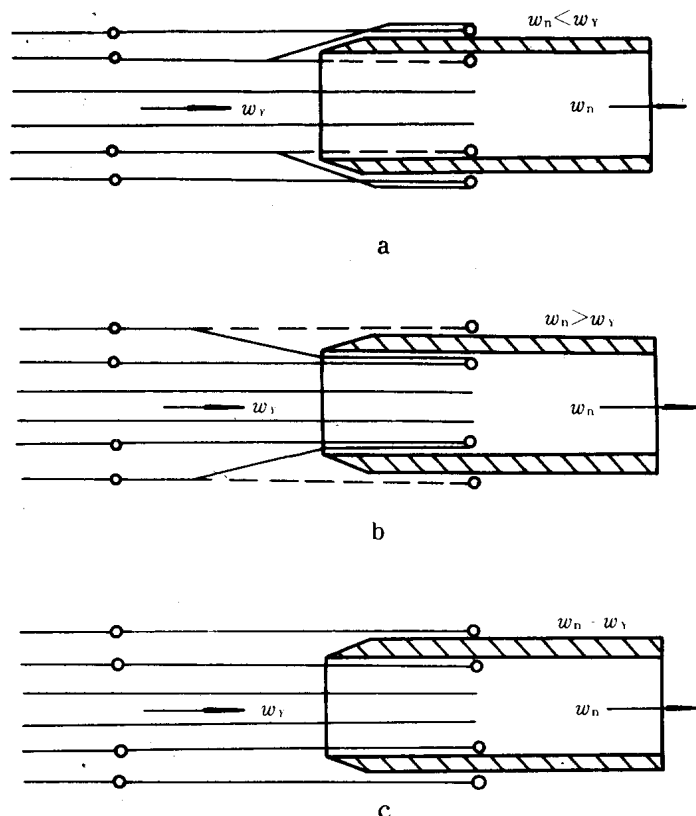


图 E1

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 E1a 所示,致使测定的含尘量高于实际情况。当 $w_n > w_y$ 时,如图 E1b,与上相反,测定值偏低,所以必须等速取样(图 E1c)。

E2 取样方法

E2.1 等速取样可以采用流量调节法

E2.2 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。

E3 测量方法

测量装置见图 E1。

E3.1 先测定烟道烟气的流速 w_y 、温度 t_y 和烟道静压 p_i ,选择与真空泵流量相适应的取样头直径 d 。

E3.2 预热取样管,宜使管内温度预热到 $300 \sim 400^\circ\text{C}$ 。

E3.3 开启真空泵预采烟气,求取流量计前温度 t_q 和压力 p_q 。

E3.4 进行近似等速试取样,近似等速试取样时的流量 V'_{rs} 按式(E1)计算:

$$V'_{rs} = 2.527 \times 10^{-3} d^2 w_y \frac{p_d + p_i}{273 + t_y} \sqrt{\frac{273 + t_q}{p_d + p_q}} \dots\dots\dots (E1)$$

式中: V'_{rs} ——近似等速试取样流量, L/min;

d ——取样头的直径, mm;

w_y ——烟道内烟气的流速, m/s;

p_j ——烟道静压, Pa;

p_d ——当地大气压, Pa;

t_y ——烟道内烟气温度, °C;

t_d ——流量计前烟气温度, °C;

p_q ——流量计前烟气压力, Pa。

E3.5 取 V'_{rs} 大小试取样 20 min, 求得冷凝水量 $G_{rs}(g)$, 计算每分钟冷凝水量 m , 按式(E2)计算:

$$m = G_{rs}/t_n \quad \dots\dots\dots (E2)$$

式中: m ——每分钟冷凝水量, g/min;

G_{rs} ——试取样时冷凝水量, g;

t_n ——试取样时间, min。

E3.6 进行等速取样, 等速取样时的流量按式(E3)计算:

$$V'_r = 2.527 \times 10^{-3} d^2 w_y \frac{p_d + p_j}{273 + t_y} \sqrt{\frac{273 + t_q}{p_d + p_q}} - 0.186 m \sqrt{\frac{273 + t_q}{p_d + p_q}} \quad \dots\dots\dots (E3)$$

式中: V' ——等速取样流量, L/min;

d ——取样头的直径, mm;

w_y ——烟道内烟气流速, m/s;

p_j ——烟道静压, Pa;

p_d ——当地大气压, Pa;

t_y ——烟道内烟气温度, °C;

t_q ——流量计前烟气温度, °C;

p_q ——流量计前烟气压力, Pa;

m ——冷凝水量, g/min。

附录 F

余热锅炉炉体散热损失

(参考件)

F1 砖砌炉墙的余热锅炉炉体散热损失可按表 F1 选取。

表 F1

| 额定蒸发量 D , t/h | ≤2 | 4 | 6 | 10 | 15 | 20 |
|-----------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 散热损失 q_s , % | 3.5 | 2.9 | 2.4 | 1.7 | 1.5 | 1.3 |

热水余热锅炉按 0.7 MW 折 1 t/h 蒸汽计算额定蒸发量。

F2 出力小于 2 t/h 及烟管余热锅炉可按式(F1)计算:

$$q_s = \frac{400 A}{Q_r} \times 100 \quad \dots\dots\dots (F1)$$

式中: q_s ——炉体散热损失, %;

A ——炉体散热表面积, m²;

Q_r ——输入热量, kJ/h。

附录 G

动压测量管的校准系数测定

(参考件)

G1 吹气式校准风洞的测量装置如图 G1 所示。

校准系数 K 按式(G1)计算:

$$K = w_0/w_1 = \sqrt{\Delta p_0/\Delta p_1} \quad \dots\dots\dots (G1)$$

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, m/s;

w_1 ——动压测量管校准时的速度, m/s;

Δp_0 ——校准风洞的全压和静压之差, Pa;

Δp_1 ——动压测量管的全压和静压之差, Pa。

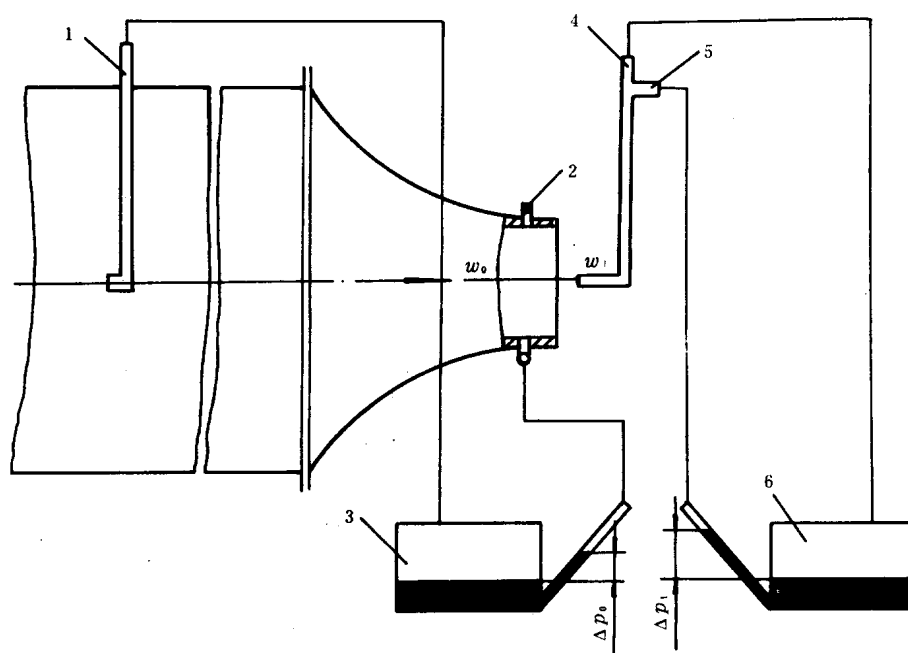


图 G1

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

G2 吸气式校准风洞的测量装置如图 G2 所示。

校准系数 K 按式(G2)计算:

$$K = w_0/w_1 = \sqrt{\Delta p_0/1.15\Delta p_1} \quad \dots\dots\dots (G2)$$

式中: K ——被校动压测量管的校准系数;

w_0 ——校准风洞管道内的速度, m/s;

w_1 ——动压测量管校准时的速度, m/s;

Δp_0 ——校准风洞的静压, Pa;

Δp_1 ——动压测量管的全压和静压之差, Pa。

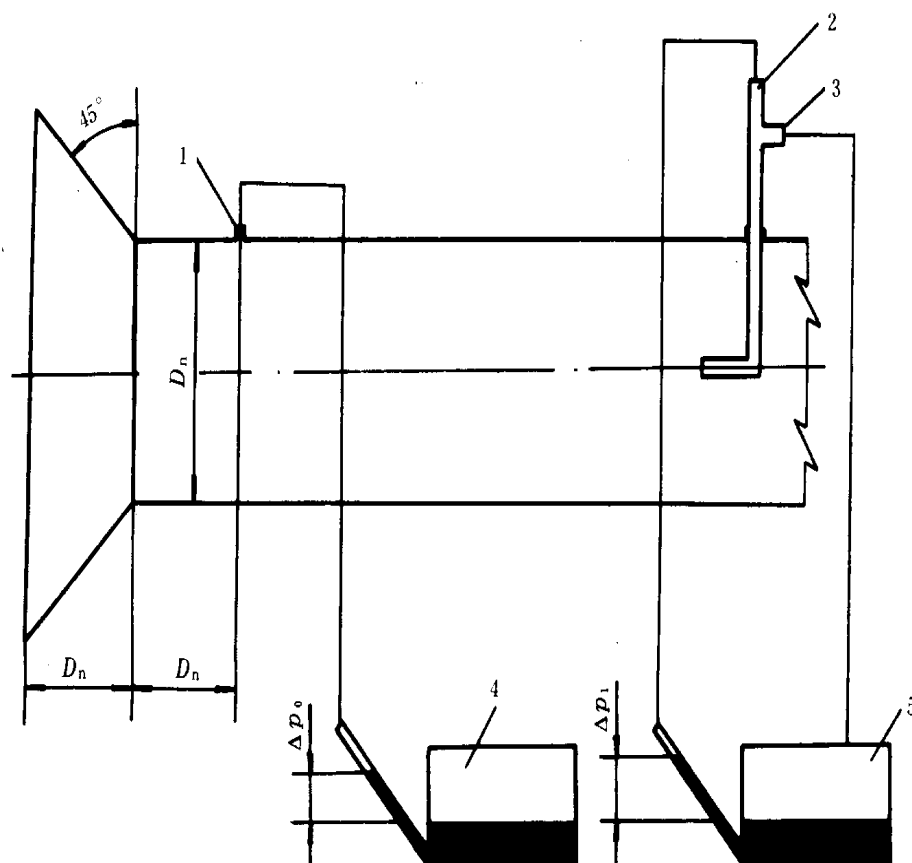


图 G2

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_n —风洞管道内径

附加说明:

本标准由杭州余热锅炉研究所归口并负责起草。

本标准主要起草人杜涛恒。