

中华人民共和国国家标准

工业燃料炉热平衡测定与计算
基本规则

GB/T 13338—91

Basic rules for
the measurement and calculation of thermal
equilibrium of fuel-fired furnace in industry

1 主题内容与适用范围

本标准规定了使用燃料的工业炉热平衡测定与计算的基本规则。一般加热炉的热平衡测定与计算可直接参照本标准执行,对一些特殊类型的工业炉,可根据本标准制订其相应的标准(以下简称《热平衡标准》)。

本标准适用于使用燃料的工业炉,如轧钢加热炉、均热炉、热处理炉、冲天炉等以及各种用途的隧道窑、倒焰窑和其他工业炉窑等(以下简称工业炉)。

本标准中所列的测定项目对各类工业炉不是必须全部进行的,本标准也没有包括各类工业炉所有的热平衡测定项目。各类工业炉的测定项目应在其《热平衡标准》中具体规定,补充列出本标准所未包括的项目。

2 引用标准

- GB 211 煤中全水分的测定方法
- GB 212 煤的工业分析方法
- GB 213 煤的发热量测定方法
- GB 214 煤中全硫的测定方法
- GB 260 石油产品水分测定法
- GB 384 石油产品热值测定法
- GB 388 石油产品硫含量测定法(氧弹法)
- GB 474 煤样的制备方法
- GB 475 商品煤样采取方法
- GB 476 煤的元素分析方法
- GB 508 石油产品灰分测定法
- GB 1884 石油和液体石油产品密度测定法(密度计法)
- GB 1885 石油计量换算表
- GB 2586 热量单位符号与换算
- GB 2587 热设备能量平衡通则
- GB 2588 设备热效率计算通则

3 术语

除下列术语外,本标准所采用的其他术语的定义见 GB 2587 第 2 章“基本用语的概念”。

3.1 窑

窑是某些工业炉的通称,通常用于物料的焙烧和非金属烧结熔化等。

3.2 供热期

各类间歇式工业炉的供热期的概念,应按本标准 5.2 条的要求在其各自的《热平衡标准》中具体规定。

4 热平衡和热收支项目

4.1 热平衡

体系热收入总和(ΣQ_r)等于体系热支出总和($\Sigma Q'_r$),

即: $\Sigma Q_r = \Sigma Q'_r$

4.2 热收入项目

工业炉热收入项目一般包括下列项目:

- a. 燃料燃烧的化学热(Q_{rh});
- b. 燃料带入的物理热(Q_{rw});
- c. 助燃空气预热带入的物理热(Q_k);
- d. 其他工质带入的物理热(Q_{rw});
- e. 物料带入的物理热(Q_w);
- f. 物料化学反应放热(Q_h);
- g. 装料装置带入的物理热(Q_m);
- h. 其他热收入(Q_{qr})。

4.3 热支出项目

工业炉热支出一般包括下列项目:

- a. 物料带出的物理热(Q'_w);
- b. 物料化学反应吸热(Q'_h);
- c. 烟气带走的物理热(Q'_y);
- d. 化学不完全燃烧损失(Q'_{hb});
- e. 机械不完全燃烧热损失(Q'_{fb});
- f. 燃煤灰渣带走的物理热(Q'_{ls});
- g. 装料装置带走的物理热(Q'_m);
- h. 炉体和其他管道表面散热(Q'_{sr});
- i. 体系的积蓄热(Q'_{xr});
- j. 炉门及孔洞辐射热损失(Q'_{lr});
- k. 炉门及孔洞冒气热损失(Q'_{mq});
- l. 其他工质带走的热量(Q'_{rw});
- m. 其他热支出(Q'_{qr})。

5 热平衡测定

5.1 测定的准备工作

5.1.1 确定测定对象和范围。

5.1.2 组织测定组,并加以培训。

5.1.3 收集测定对象的资料,如设计资料、运行资料、气象资料等。

5.1.4 根据热平衡测定标准编制测定方案,其内容一般应包括:

- a. 测定体系的确定;
- b. 计算基准的确定;
- c. 应测参数和相应的测定方法、计算公式的选定;
- d. 测定仪器、仪表的选型;
- e. 测定工况、测定持续时间和各项参数测定程序的规定;
- f. 测定记录表格的制定;
- g. 测定工作计划的拟定。

5.2 测定条件和测定持续时间

5.2.1 热平衡测定应在正常工况下进行。

对连续式炉,应在入炉炉料成分、品种、规格不变,炉子处于热稳定工况下连续测定两次以上,每次不得少于1 h。

对间歇式炉,测定时间不得少于一个供热期,即自开始加热至完全停止供热止。工况应在各类工业炉的《热平衡标准》中具体规定,要求测定结果能正确反映该炉热量利用状况和水平。

5.2.2 测定用仪表的准确度,一般应达到0.1~1.5%(或相当的精度等级),特殊要求应在相应的《热平衡标准》中具体规定。

5.3 热平衡体系的确定

热平衡体系一般指炉膛或包括炉膛和余热回收装置的全炉的热平衡体系。各类工业炉体系的具体划分,应在各自的《热平衡标准》中明确规定。

5.4 计算基准

5.4.1 基准温度

原则上以距离炉子周围1 m处的平均环境温度为基准温度。若采用其他温度应加以说明。

5.4.2 燃料发热量

对固体和液体燃料采用应用基低(位)发热量(Q_{ar})。

对气体燃料采用湿成份的低(位)发热量(Q_{ar})。

5.4.3 时间基准

对连续式炉,取1 h;

对间歇式炉,取一个供热期。

5.4.4 单位

按GB 2586的规定。

5.5 测定项目和测定方法

为了求得工业炉热平衡计算中各热收入项和热支出项,一般须按所选定的测定方法,列出主要测定项目分类并进行下列各项测定。对特殊的测定项目,应在其相应的《热平衡标准》中补充规定。

5.5.1 燃料

5.5.1.1 燃料用量的测定

固体燃料用秤称量。液体燃料用容器或体积式流量计算,然后再根据密度换算成重量。气体燃料根据压力、温度换算成标准状态下的体积流量。

工厂具备上述计量装置时,燃料用量可由工厂的计量装置读取。

5.5.1.2 燃料的取样分析及发热量的测定

a. 固体燃料

按GB 475、GB 474、GB 212、GB 476、GB 211、GB 214和GB 218进行。

b. 液体燃料

取样:在热平衡测定期间内,从喷嘴前管道中连续取 2 kg 油样,混合均匀后,迅速倒入两只约 1 kg 的瓶内装满密封,以备分析。

分析:元素分析可按 GB 476 进行,其余按 GB 206、GB 388、GB 508、GB 384、GB 1884 和 GB 1885 进行。

c. 气体燃料

取样:在燃烧器前管道上的取样孔取样,一般每小时取一次。如果煤气成分波动较大,可适当缩短取样时间。

成分分析:用气体全分析仪进行。

含水量:用吸收法或露点法测定。

将分析成分及含水量换算成湿成分,然后用公式计算发热量。

5.5.1.3 燃料压力及温度的测定

在预热器前后和燃烧器前,用水银温度计或热电阻温度计测温,用压力计测量压力。对固体燃料温度取环境温度。

5.5.2 助燃空气

5.5.2.1 空气量

在燃烧器前空气管道上用孔板流量计或皮托管、热球风速计测量。在无法测量或体系有吸风时,应根据燃料用量、成分及烟气成分算出。

对固体和液体燃料,在无元素分析时可由经验公式算出。

5.5.2.2 空气温度

在燃烧器入口处和预热器的出口及入口处,用工业水银温度计或热电偶等测温。

5.5.2.3 空气湿度

用干湿球温度计测相对湿度,再换算成绝对湿度。

5.5.3 其他工质

其他工质包括:雾化蒸汽、冷却水、汽化冷却用水、保护气体等。具体项目根据工业炉的特点和工艺要求,在其《热平衡标准》中规定。

5.5.3.1 雾化蒸汽

a. 用量

用蒸汽流量计或孔板流量计测定。

b. 压力

由燃烧器前的压力表读取压力值。

c. 温度

可由蒸汽压力值查表得出。

5.5.3.2 冷却水

a. 用量

在冷却水的入口和出口处分别用流量计测定或体积计算法算出。

b. 温度

在冷却水的入口和出口处用水银温度计测定。

c. 压力

在入口处装压力表测定。

5.5.3.3 汽化冷却用水

a. 蒸发量

对蒸发量大的工业炉,可用流量孔板和相应的二次仪表测定。一般工业炉可通过水表或水箱测量给水量。

b. 蒸汽温度、压力和给水温度

蒸汽温度和压力分别用温度计和压力表读取,给水温度用水银温度计在进口处测定。

c. 蒸汽湿度

用氯根法等方法测定。

5.5.3.4 保护气体**a. 用量**

在管道上安装气体流量计测量。

b. 温度

入炉温度可采用环境温度,出炉温度取测定时加热物料的表面温度。

5.5.4 烟气**5.5.4.1 温度测定**

在炉膛烟道入口处、预热装置的入口、出口处测定。

测定烟气通路各截面的烟气平均温度,特别要选择炉膛烟道入口处不受装料入口进入空气影响的测点。用抽气式热电偶测定。

5.5.4.2 烟气取样及分析

烟气取样位置与烟气温度测点位置相同。

烟气成分分析用气体全分析仪。

5.5.4.3 烟气流

可根据燃料用量,成分及烟气成分计算烟气流。在烟道具备测定条件时,可用皮托管、微压计测量多点烟气速度后算出。

5.5.4.4 烟气含碳浓度

用烟尘测定仪或其他可靠方法测定。测点位置与烟气取样位置相同。

5.5.5 燃煤灰渣**a. 灰渣量**

收集在测定期间内的全部灰渣量并进行称量。不具备条件时,可从燃料用量,燃料灰份及渣中未燃成分计算得出。

b. 灰渣温度测定

燃煤灰渣温度用插入式热电偶测定,测多点取平均值。

c. 灰渣含碳量测定

灰渣取样按 GB 475 并按 GB 212 测含碳量。

5.5.6 加热物料**5.5.6.1 物料质量**

一般用秤称量,也可根据尺寸、密度算出。若炉内物料量因烧损变化大时,应分别测定热平衡开始与结束时物料的重量。

5.5.6.2 物料成分

化验或根据有关资料查取。

5.5.6.3 物料温度

物料的入炉温度和出炉温度(间歇炉停止供热时的温度)可用接触式表面温度计、光电温度计测定其表面温度,再由表面温度计算出物料的平均温度。

5.5.7 炉膛温度和压力**5.5.7.1 炉膛压力**

由现场仪表直接读取或用便携式微压计测定,测点位置按热工测试有关规定确定。

5.5.7.2 炉膛温度

用现场的仪表读取或用热电偶和相应的二次仪表测定,测点位置按热工测试有关规定确定。

5.5.8 炉体、余热回收装置、管道表面温度与热流密度

测定炉体、余热回收装置和炉膛至余热回收装置间预热空气(煤气)管道等外表面温度,可将体系表面分成若干个温度相近的区域,用表面温度计、半导体点温计等测各部表面的温度并取平均值。计算热流密度,或用热流计直接测定各部表面的平均热流密度。

5.5.9 炉门及窥孔

记录炉门及窥孔的开启时间,测量炉门及窥孔尺寸,同时测定炉门及窥孔处炉气的温度压力并取样分析,其方法分别按第 5.5.4.2、5.5.7.2 和 5.5.7.1 条进行。

6 热平衡计算方法

6.1 热收入项的计算

6.1.1 燃料燃烧的化学热(Q_{rh})

$$Q_{rh} = BQ_{dw}^y, \text{kJ/h(T)} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\text{或 } Q_{rh} = BQ_{dw}^s, \text{kJ/h(T)} \quad \dots\dots\dots (2)$$

式中: B —— 燃料用量, kg/h(T) 或 $\text{Nm}^3/\text{h(T)}$;

Q_{dw}^y —— 固体或液体燃料应用基低(位)发热量, $\text{kJ/kg(Nm}^3\text{)}$;

Q_{dw}^s —— 气体燃料湿成分低(位)发热量, kJ/Nm^3 ;

T —— 间歇式炉供热周期。

$$Q_{dw}^s = 126\text{CO}^s + 108\text{H}_2^s + 234\text{H}_2\text{S}^s + 358\text{CH}_4^s + 598\text{C}_m\text{H}_n^s, \text{kJ/Nm}^3 \quad \dots\dots\dots (3)$$

式中: CO^s 、 CH_4^s 、 H_2S^s 、 H_2^s 、 C_mH_n^s 分别为气体燃料各湿成分的体积含量, %。

注: 热平衡中热收支项热量也可用 kJ/t 表示, 即: 每吨入炉或出炉物料的热量。

6.1.2 燃料带入的物理热(Q_{rw})

$$Q_{rw} = B(C_r t_r - C_{yo} t_o), \text{kJ/h(T)} \quad \dots\dots\dots (4)$$

式中: t_r 、 t_o —— 分别为燃料入炉温度和基准度, $^{\circ}\text{C}$;

C_r 、 C_{yo} —— 分别为 0°C 至入炉温度和基准温度间燃料的平均比热容, $\text{kJ/kg(Nm}^3\text{)} \cdot ^{\circ}\text{C}$ 。

对固体燃料:

$$C_r = C_r^s \frac{100 - W^y}{100} + \frac{4.18W^y}{100}, \text{kJ/kg} \cdot ^{\circ}\text{C} \quad \dots\dots\dots (5)$$

式中: C_r^s —— 燃料的干燥基比热容;

W^y —— 燃料应用基含水量。

对无烟煤、贫煤及油页岩:

$$C_r^s = 0.92 \text{ kJ/kg} \cdot ^{\circ}\text{C}$$

对其他煤种:

$$C_r^s = 1.09 \text{ kJ/kg} \cdot ^{\circ}\text{C}$$

对液体燃料:

GB/T 13338—91

$$C_r = 1.735 + 0.0025t_r, \text{kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C} \quad \dots\dots\dots (6)$$

对气体燃料:

$$C_r = (C_{\text{CO}}CO^* + C_{\text{CO}_2}CO_2^* + C_{\text{H}_2}H_2^* + \dots) \times \frac{1}{100} \quad \dots\dots\dots (7)$$

式中: C_{CO_2} 、 C_{CO} 、 C_{H_2} ——湿气体燃料中 CO_2 、 CO 、 H_2 等成分的平均比热容, $\text{kJ/Nm}^3 \cdot ^\circ\text{C}$;

气体燃料中水分的体积含量(H_2O^*)按下式计算:

$$\text{H}_2\text{O}^* = \frac{0.124 g_m}{100 + 0.124 g_m} \times 100, \% \quad \dots\dots\dots (8)$$

式中: g_m ——干气体燃料含水量, g/Nm^3 。

6.1.3 助燃空气带入的物理热(Q_k)

$$Q_k = V_k(C_k t_k - C_{k0} t_0), \text{kJ/h(T)} \quad \dots\dots\dots (9)$$

或

$$Q_k = B \cdot \alpha L_o^*(C_k t_k - C_{k0} t_0), \text{kJ/h(T)} \quad \dots\dots\dots (10)$$

式中: V_k ——助燃空气实测空气量, $\text{Nm}^3/\text{h(T)}$;

α ——空气系数;

L_o^* ——理论湿空气量, Nm^3/kg 或 Nm^3/Nm^3 ;

$$L_o^* = L_o^s(1 + 0.000124 g_k) \quad \dots\dots\dots (11)$$

L_o^s ——理论干空气量, Nm^3/kg 或 Nm^3/Nm^3 ;

g_k ——干空气的含水量, g/Nm^3 ;

t_k ——空气进入体系时的温度, $^\circ\text{C}$;

C_k ——空气在 0°C 至进入体系时的温度 t_k 间的平均比热容, $\text{kJ/Nm}^3 \cdot ^\circ\text{C}$;

C_{k0} ——空气在 0°C 至基准温度 t_0 间的平均比热容, $\text{kJ/Nm}^3 \cdot ^\circ\text{C}$ 。

a. 对固体、液体燃料:

$$\alpha = \frac{N_2^y}{N_2^y - 3.76(O_2^y - 0.5\text{CO}^y - 0.5\text{H}_2^y - 2\text{CH}_4^y)} \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$L_o^s = 0.0889C^y + 0.2667H^y - 0.0333(O^y - S^y) \quad \dots\dots\dots (13)$$

式中: O_2^y 、 CO^y 、 H_2^y 、 CH_4^y 及 N_2^y ——干烟气中各成分的体积含量, %;

C^y 、 H^y 、 O^y 及 S^y ——燃料的各应用基成分含量, %。

当无燃料的元素分析数据, 而只有燃料的应用基低位发热量(Q_{dw}^y)数据时, 可按下列公式求出 L_o^s :

对固体燃料:

$$L_o^s = 1.01 \frac{Q_{dw}^y}{1000} + 0.5, \text{Nm}^3/\text{kg} \quad \dots\dots\dots (14)$$

对液体燃料:

$$L_o^s = 0.85 \frac{Q_{dw}^y}{1000} + 2, \text{Nm}^3/\text{Nm}^3 \quad \dots\dots\dots (15)$$

b. 对气体燃料:

$$\alpha = \frac{21}{21 - 79 \frac{O_2^g - 0.5CO^g - 0.5H_2^g - 2CH_4^g}{N_2^g - \frac{N_2^g(CO_2^g + CO^g + CH_4^g + SO_2^g)}{CO_2^g + CO^g + CH_4^g + mC_mH_n + H_2S^g}}} \quad \dots\dots\dots(16)$$

$$L_o^g = 0.023\ 8(H_2^g + CO^g) + 0.095\ 2\ CH_4^g \\ + 0.047\ 6(m + \frac{n}{4})C_mH_n^g + 0.071\ 4\ H_2S^g \\ - 0.047\ 6O_2^g, Nm^3/Nm^3 \quad \dots\dots\dots(17)$$

式中: O_2^g 、 CO^g 、 H_2^g 、 CH_4^g 、 CO_2^g 、 SO_2^g 、 N_2^g ——干烟气中各成分的体积含量, %;

N_2^g 、 CO^g 、 CH_4^g 、 $C_mH_n^g$ 、 H_2S^g 、 H_2^g 、 O_2^g ——燃料的各湿成分, %。

6.1.4 其他工质带入的物理热(Q_{rw})

其他工质带入的物理热,包括雾化蒸汽、压缩空气、冷却水、汽化冷却用水、保持气体等带入的物理热。具体项目和计算方法应在相应的《热平衡标准》中规定。

6.1.5 物料带入的物理热(Q_w)

$$Q_w = m_w(C_w t_w - C_{w0} t_0), kJ/h(T) \quad \dots\dots\dots(18)$$

式中: m_w ——入炉物料的质量, kg/h(T);

C_w 、 C_{w0} ——分别为 0℃ 至入炉温度(t_w)和基准温度(t_0)间的平均比热容, kJ/kg·℃。

6.1.6 物料化学反应放热(Q_h)

$$Q_h = \sum I_i m_i, kJ/h(T) \quad \dots\dots\dots(19)$$

式中: m_i ——参加反应元素(或化合物)的质量, kg/h(T);

I_i ——每公斤该元素(或化合物)的反应热, kJ/kg。

6.1.7 装料装置带入的物理热(Q_{zx})

$$Q_{zx} = \sum m_{zi}(C_{zi} t_{zi} - C_{zi0} t_0), kJ/h(T) \quad \dots\dots\dots(20)$$

式中: m_{zi} ——各种装置的质量, kg/h(T);

C_{zi} 、 C_{zi0} ——分别为各装置在 0℃ 至入炉温度(t_{zi})和环境温度(基准温度)(t_0)间的平均比热容, kJ/kg·℃;

t_{zi} ——装料装置入炉温度, ℃。

6.1.8 其他热收入(Q_{qt})

应根据各类工业炉的特点、物料的组成、工艺要求等在其《热平衡标准》中具体规定。

6.1.9 热收入项总和(ΣQ_r)

$$\Sigma Q_r = Q_{rh} + Q_{rw} + Q_k + Q_{zx} + Q_w + Q_h \\ + Q_{zx} + Q_{qt}, kJ/h(T) \quad \dots\dots\dots(21)$$

6.2 热支出项计算

6.2.1 物料带出的物理热(Q'_w)

$$Q'_w = m'_w(C_w t'_w - C_{w0} t_0), kJ/h(T) \quad \dots\dots\dots(22)$$

式中: m'_w ——出炉物料的质量, kg/h(T);

C_w, C_{w0} ——物料在 0℃ 至出炉温度(t'_w)和基准温度(t_0)间的平均比热容, kJ/kg·℃;

t'_w ——物料出炉温度, ℃。

6.2.2 物料化学反应吸热(Q'_k)

物料化学反应吸热根据物料的组成和化学反应而定, 计算方法参见第 6.1.6 条。

6.2.3 烟气带走的物理热(Q'_y)

$$Q'_y = V_y(C_y t_y - C_{y0} t_0), \text{kJ/h(T)} \quad \dots\dots\dots (23)$$

式中: C_y, C_{y0} ——分别为在 0℃ 至烟气温度(t_y)和基准温度(t_0)间的平均比热容, kJ/Nm³·℃;

t_y ——烟道入口处烟气温度, ℃;

V_y ——烟气量, Nm³/h(T)(实测)。

若烟气量实测有困难, 可按下式计算:

$$V_y = B(1 - K)V_n^* \cdot b - \Sigma V_{mg}, \text{Nm}^3/\text{h(T)} \quad \dots\dots\dots (24)$$

V_n^* ——完全燃烧时的实际烟气量, Nm³/kg(Nm³);

b ——不完全燃烧时烟气量修正系数;

当 $\alpha \geq 1$ 时:

$$b = \frac{100}{100 - 0.5\text{CO}^* - 0.5\text{H}_2^*}$$

当 $\alpha < 1$ 时:

$$b = \frac{100}{100 + 1.88\text{CO}^* + 1.88\text{H}_2^* + 9.52\text{CH}_4^* - 4.76\text{O}_2^*} \quad \dots\dots\dots (25)$$

K ——机械不完全燃烧损失率, $K = \frac{Q'_{jb}}{BQ_{dw}^*}$

Q'_{jb} ——机械不完全燃烧热损失。

ΣV_{mg} ——炉门或窥孔冒气量, Nm³/h(T)。计算方法见第 6.2.11 条。

6.2.3.1 实际湿烟气量计算

a. 对固体和液体燃料

$$V_n^* = V_0 + [\alpha(1 + 0.00124g_k) - 1]L_0^* + 1.24G_s, \text{Nm}^3/\text{kg} \quad \dots\dots\dots (26)$$

$$V_0 = 0.0187C^y + 0.112H^y + 0.007S^y + 0.008N^y \\ + 0.0124W^y + 0.79L_0^*, \text{Nm}^3/\text{kg} \quad \dots\dots\dots (27)$$

$$L_0^* = 0.089C^y + 0.2667H^y - 0.0333(O^y - S^y), \text{Nm}^3/\text{kg} \quad \dots\dots\dots (28)$$

b. 对气体燃料

$$V_n^* = V_0 + [\alpha(1 + 0.00124g_k) - 1]L_0^*, \text{Nm}^3/\text{Nm}^3 \quad \dots\dots\dots (29)$$

$$V_0 = 0.01[\text{CO}^* + 3\text{CH}_4^* + (m + \frac{n}{2})C_mH_n^* \\ + \text{CO}_2^* + \text{H}_2^* + 2\text{H}_2\text{S}^* + \text{N}_2^* + \text{H}_2\text{O}^*] \\ + 0.79L_0^*, \text{Nm}^3/\text{Nm}^3 \quad \dots\dots\dots (30)$$

$$L_g^s = 0.0238(H_2^s + CO^s) + 0.0952CH_4^s + 0.0476(m + \frac{n}{4})C_mH_n^s + 0.0714H_2S^s - 0.0476O_2^s, Nm^3/Nm^3 \quad \dots\dots\dots (31)$$

在以上各式中:

V_o ——理论烟气量, $Nm^3/kg(Nm^3)$;

L_g^s ——理论干空气量, $Nm^3/kg(Nm^3)$;

C^s, H^s, S^s, W^s ——分别为固体、液体燃料中各元素的应用基成分和含水量, %;

$CO^s, CH_4^s, C_mH_n^s, CO_2^s, H_2^s, H_2S^s, N_2^s, H_2O^s$ ——气体燃料中各湿成分的体积含量, %;

g_k ——干空气含水量, g/Nm^3 ;

G_g ——每公斤液体燃料的雾化蒸汽用量, kg/kg 。

6.2.3.2 烟气平均比热容计算(C_y)

$$C_y = \frac{1}{100} \sum Z_{yi}^s \cdot C_{yi}^s, kJ/Nm^3 \cdot ^\circ C \quad \dots\dots\dots (32)$$

式中: Z_{yi}^s ——湿烟气中各成分体积含量, %;

C_{yi}^s ——湿烟气中各成分的平均比热容, $kJ/Nm^3 \cdot ^\circ C$ 。查表。

用于烟气成分换算湿烟气成分方法:

a. 实际湿烟气的水分含量(H_2O^s)

对固体、液体燃料:

$$H_2O^s = \frac{0.224\left(\frac{H^s}{2} + \frac{W^s}{18}\right) + 0.00124g_k a L_g^s + 1.24G_g}{bV_n^s} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (33)$$

对气体燃料:

$$H_2O^s = \frac{0.01(2CH_4^s + H_2^s + \frac{n}{2}C_mH_n^s + H_2S^s) + 0.00124g_k a L_g^s}{bV_n^s} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (34)$$

b. 湿烟气中任意成分(Z^s)

$$Z^s = Z'^s \cdot \frac{100 - H_2O^s}{100} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (35)$$

式中: Z'^s ——干烟气中与 Z^s 相应成分, %。

6.2.4 烟气中带走的化学不完全燃烧热损失(Q'_{hb})

$$Q'_{hb} = (1 - K)BbV_n^s(126CO'^s + 108H_2'^s + 358CH_4'^s + 589C_mH_n'^s), kJ/h(T) \quad \dots\dots\dots (36)$$

6.2.5 机械不完全燃烧热损失(Q'_{jb})

$$Q'_{jb} = Q'_z + Q'_c, kJ/h(T) \quad \dots\dots\dots (37)$$

式中: Q'_z ——灰渣中残碳损失热量, $kJ/h(T)$;

Q'_c ——烟气中残碳损失热量, $kJ/h(T)$ 。

6.2.5.1 灰渣中残碳损失热量(Q'_z)

$$Q'_z = 33\,907 G_{hz} \cdot C_{hz}, \text{kJ/h(T)} \quad \dots\dots\dots (38)$$

式中: C_{hz} ——灰渣中含碳量, %;

G_{hz} ——灰渣量, kg/h(T); 实测或按下式计算:

$$G_{hz} = B A_r^z / A_{hz}^g, \text{kg/h(T)}$$

式中: A_r^z ——煤的应用基含灰量, %;

A_{hz}^g ——灰渣的干基含水量, %。

6.2.5.2 烟气中残碳损失热量(Q'_c)

$$Q'_c = 327 [B(1 - K) V_a^b - \Sigma V_{mg}] C_{yq} \times 10^{-6}, \text{kJ/h(T)} \quad \dots\dots\dots (39)$$

式中: C_{yq} ——烟气中残碳量, mg/m³。

6.2.6 燃料灰渣带出的物理热(Q'_{hz})

$$Q'_{hz} = G_{hz} (C_{hz} t_z - C_{zo} t_o), \text{kJ/h(T)} \quad \dots\dots\dots (40)$$

式中: C_{hz} 、 C_{zo} ——灰渣在 0℃ 至灰渣温度(t_z)及基准温度(t_o)间的平均比热容, kJ/kg · °C。

t_z ——灰渣温度, °C。

6.2.7 装料装置带出的物理热(Q'_{zz})

$$Q'_{zz} = \Sigma m_{zi} (C'_{zi} t'_{zi} - C_{zio} t_o), \text{kJ/h(T)} \quad \dots\dots\dots (41)$$

式中: m_{zi} ——各种装置的质量, kg/h(T);

C'_{zi} 、 C_{zio} ——分别为各装置在 0℃ 至出炉温度(t'_{zi})和基准温度(t_o)间的平均比热容, kJ/kg · °C;

t'_{zi} ——各装料装置的出炉温度, °C。

6.2.8 炉体和其他管道表面散热损失(Q'_{sr})

对连续式炉:

$$Q'_{sr} = \Sigma Q_i \cdot A_i, \text{kJ/h} \quad \dots\dots\dots (42)$$

对间歇式炉:

$$Q'_{sr} = \Sigma Q_i \cdot A_i \cdot T, \text{kJ/T} \quad \dots\dots\dots (43)$$

式中: T ——间歇式炉供热周期时间, h;

A_i —— i 部炉体或其他管道表面积, m²;

Q_i —— i 部炉体或其他管道表面热流密度, kJ/m² · h。用热流计直接测出。

若不能直接测出热流密度值时, 可按下式计算:

$$Q_i = 20.43 \epsilon \left[\left(\frac{273 + t_b}{100} \right)^4 - \left(\frac{273 + t_o}{100} \right)^4 \right] + \alpha_d (t_b - t_o), \text{kJ/m}^2 \cdot \text{h} \quad \dots\dots (44)$$

式中: ϵ ——炉体或其他管道表面黑度;

t_b ——炉体或其他管道表面温度, °C;

α_d ——对流给热系数, kJ/m² · h · °C。

无风时, 对于:

$$\text{散热面向上} \quad \alpha_d = 11.7 (t_b - t_o)^{\frac{1}{4}} \quad \dots\dots\dots (45)$$

$$\text{散热面向下} \quad \alpha_d = 6.3(t_b - t_o)^{\frac{1}{4}} \quad \dots\dots\dots(46)$$

$$\text{散热面垂直} \quad \alpha_d = 9.2(t_b - t_o)^{\frac{1}{4}} \quad \dots\dots\dots(47)$$

$$\text{横置圆柱} \quad \alpha_d = 8.8\left(\frac{t_b - t_o}{d}\right)^{\frac{1}{4}} \quad \dots\dots\dots(48)$$

式中: d ——圆柱外径, m。

当风速 $W_f < 5$ m/s 时:

$$\alpha_d = 22.2 + 15.1 W_f \quad \dots\dots\dots(49)$$

当风速 $W_f > 5$ m/s 时:

$$\alpha_d = 27 W_f^{0.78} \quad \dots\dots\dots(50)$$

6.2.9 体系的积蓄热(Q'_{xr})

$$Q'_{xr} = \sum V_i \rho_i (C_{mi} t_{mi} - C_{si} t_{si}), \text{kJ/T} \quad \dots\dots\dots(51)$$

式中: V_i ——各部分炉衬体积, m^3 ;

ρ_i ——各部分炉衬密度, kg/m^3 ;

t_{mi}, t_{si} ——各部分炉衬加热终了和开始加热时的平均温度, $^{\circ}\text{C}$;

C_{mi}, C_{si} ——各部分炉衬在 0°C 至加热终了温度(t_{mi})和开始加热温度(t_{si})间的平均比热容, $\text{kJ}/\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C}$ 。

注: ① 对多层炉衬, 应以各层的平均温度分别计算各层的积蓄热, 然后相加。

② 积蓄热的测定和计算方法, 允许用其他简单、准确方法进行。各类工业炉的积蓄热的具体测定和计算方法, 应在其《热平衡标准》中明确规定。

③ 连续式炉的积蓄热, 一般可略去不计, 在特殊情况, 可在其《热平衡标准》中规定。

6.2.10 炉门和孔洞辐射热损失(Q'_{fs})

$$Q'_{fs} = 20.41 \sum A_i \phi \tau \left[\left(\frac{t_1 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_n + 273}{100} \right)^4 \right], \text{kJ/h(T)} \quad \dots\dots\dots(52)$$

式中: t_1 ——炉温, $^{\circ}\text{C}$;

ϕ ——角度系数;

τ ——间歇式炉测定周期内炉门开启时间, h; 对连续炉为每一小时内炉门开启时间, h;

A_i ——开启炉门面积, m^2 。

6.2.11 炉门及孔洞冒气热损失(Q'_{mq})

$$Q'_{mq} = Q'_{ph} + Q'_{ch}, \text{kJ/h(T)} \quad \dots\dots\dots(53)$$

式中: Q'_{ph} ——冒气带出的物理热, kJ/h(T) ;

Q'_{ch} ——冒气带出的化学热, kJ/h(T) 。

6.2.11.1 冒气带出的物理热(Q'_{ph})

$$Q'_{ph} = \sum V_{mq} (C'_y \cdot t'_y - C'_{yo} \cdot t_o), \text{kJ/h(T)} \quad \dots\dots\dots(54)$$

式中: t'_y ——炉门及孔洞处炉气的温度, $^{\circ}\text{C}$;

C_y, C'_{yo} ——分别为炉气在 0°C 至炉气温度(t'_y)及环境温度(t_o)间的平均比热容, $\text{kJ}/\text{Nm}^3 \cdot ^{\circ}\text{C}$ 。

a. 炉门及垂直孔洞的冒气量(V_{mq})

$$V_{mq} = \left\{ \left[\frac{P_1}{9.8} + (r_o - r')H \right]^{3/2} - \left(\frac{P_1}{9.8} \right)^{3/4} \right\} \\ \times \frac{281\mu b\tau \frac{P_o + P_1}{9.8}}{(r_o - r') \sqrt{r'} (273 + t'_y)}, \text{Nm}^3/\text{h(T)} \quad \dots\dots\dots (55)$$

式中: P_1 ——炉门、孔洞底部的炉气表压, Pa;

P_o ——大气压, Pa;

b ——炉门、孔洞的平均宽度, m;

τ ——炉门、孔洞开启时间, h;

r_o ——环境温度(t_o)下的空气密度, kg/m^3 ;

$$r_o = \frac{1.293}{1 + \frac{t_o}{273}} \times \frac{P_o}{101\,325} \quad \dots\dots\dots (56)$$

r' ——炉气在 t'_y 下的密度, kg/m^3 ;

$$r' = \frac{r'_o}{1 + \frac{t'_y}{273}} \times \frac{P_1 + P_o}{101\,325} \quad \dots\dots\dots (57)$$

$$r'_o = \frac{44\text{CO}_2 + 18\text{H}_2\text{O} + 64\text{SO}_2 + 28\text{N}_2 + 32\text{O}_2 + \dots}{22.4 \times 100} \quad \dots\dots\dots (58)$$

CO_2 、 H_2O 、 SO_2 、 N_2 、 O_2 ——炉门、孔洞处冒气各成分的体积含量, %;

μ ——流量系数;

对厚墙, $\mu=0.82$; 对薄墙, $\mu=0.62$ (墙厚 $\delta < 3.5d$ 为薄墙; $d=4A/S$ 为炉门、孔洞的当量直径(m); A 为炉门孔洞的面积(m^2); S 为炉门、孔洞的平均宽度)。

b. 水平孔缝的冒气量(V_{mq})

$$V_{mq} = \sqrt{\frac{P_1/9.8}{r'}} \cdot \frac{421\mu\tau A \frac{P_o + P_1}{9.8}}{273 + t'_y}, \text{Nm}^3/\text{h(T)} \quad \dots\dots\dots (59)$$

式中: A ——孔缝的冒气面积, m^2 ;

P_1 ——孔缝处的平均表压, Pa。

6.2.11.2 冒气带出的化学热(Q'_{ch})

$$Q'_{ch} = \Sigma V_{mq} (126\text{CO} + 108\text{H}_2 + 358\text{CH}_4 \\ + 589\text{C}_m\text{H}_n), \text{kJ}/\text{h(T)} \quad \dots\dots\dots (60)$$

式中: CO 、 H_2 、 CH_4 ——冒气各成分的体积含量, %。

6.2.12 其他工质带走的热量(Q'_{zw})

其他工质带走的热量包括冷却水、汽化冷却、保护气体及雾化蒸汽、压缩空气等。

具体项目和计算方法, 可根据工业炉的特点和工艺要求等参照上述各条在各自的《热平衡标准》中规定。

6.2.13 其他热支出(Q'_{qt})

应根据工业炉特点、物料组成和工艺要求在各自的《热平衡标准》中补充规定。

6.2.14 热支出项总和($\Sigma Q'$)

$$\Sigma Q'_r = Q'_w + Q'_h + Q'_y + Q'_{hb} + Q'_{jb} + Q'_{hz} + Q'_{zz} + Q'_{sr} + Q'_{xr} + Q'_{fs} + Q'_{mq} + Q'_{rw} + Q'_{qt} \dots\dots\dots (61)$$

6.3 热平衡表

将热收入、热支出各项计算结果列入热平衡表1中。

表1 热平衡表

热收入项				热支出项			
序号	项 目	热量 kJ/h(T)	%	序号	项 目	热量 kJ/h(T)	%
1	燃料燃烧化学热 Q_h			1	物料带出的物理热 Q'_w		
2	燃料带入的物理热 Q'_{rw}			2	物料化学反应吸热量 Q'_h		
3	助燃空气带入的物理热 Q'_a			3	烟气带走的物理热 Q'_y		
4	其他工质带入的物理热 Q'_{rw}			4	化学不完全燃烧热损失 Q'_{hb}		
5	物料带入的物理热 Q'_w			5	机械不完全燃烧热损失 Q'_{jb}		
6	物料化学反应放热 Q_h			6	燃煤灰渣带走的物理热 Q'_{hz}		
7	装料装置带入的物理热 Q'_a			7	装料装置带出的物理热 Q'_{zs}		
8	除以上各项外的其他热收入 Q'_{qt}			8	炉体和其他管道表面散热 Q'_{sr}		
				9	体系的积蓄热 Q'_{xr}		
				10	炉门及孔洞辐射热损失 Q'_{fs}		
				11	炉门及孔洞冒气热损失 Q'_{mq}		
				12	其他工质带走的热量 Q'_{rw}		
				13	除以上各项外的其他热支出 Q'_{qt}		
	热收入总和 ΣQ_r		100		热支出项总和 $\Sigma Q'_r$		100

6.4 热效率

工业炉热效率计算应按 GB 2588 所规定原则。各类工业炉热效率的计算应在各自的《热平衡标准》中具体规定。

7 热平衡测定报告

热平衡测试报告的内容应包括：

a. 前言

一般应包括任务的提出、测定目的、测定体系、计算基准、测定所依据的《热平衡标准》，对采用非标准测定方法的说明及测定工况等；

b. 主要设备概况及生产概况；

c. 热平衡测定和计算；

GB/T 13338—91

- d. 热平衡表;
 - e. 主要经济指标;
 - f. 分析及改进意见;
 - g. 测定单位、负责人、报告人、审核人(签字)。
-

附加说明:

本标准由中华人民共和国机械电子工业部提出。

本标准由西安电炉研究所归口。

本标准由西安电炉研究所负责起草。

本标准主要起草人王志超、李周群。