ICS 25.180.10
K 61

中华人民共和国国家标准

GB/T 13338—2018
代替 GB/T 13338—1991

工业燃料炉热平衡测定与计算基本规则

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

2018-06-07 发布　　2019-01-01 实施

国家市场监督管理总局
中国国家标准化管理委员会　发布

目　次

前言 …… Ⅲ
1　范围 …… 1
2　规范性引用文件 …… 1
3　术语和定义 …… 1
4　热平衡和热收支项目 …… 2
5　热平衡测定 …… 2
6　热平衡计算方法 …… 7
7　热平衡测定报告 …… 16

前　言

本标准按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本标准代替 GB/T 13338—1991《工业燃料炉热平衡测定与计算基本规则》，与 GB/T 13338—1991 相比主要技术变化如下：

——第 2 章“规范性引用文件”，更新了引用标准的编号、名称及性质；

——第 2 章“规范性引用文件”，增加了 GB/T 218，删除了已废止标准 GB 2586、GB 2588；

——第 3 章“术语和定义”，新增术语“3.2　热稳定态”“3.3　有效热”及其定义内容；

——删除了“5.4.4　单位”；

——“5.5.2.1　燃料用量的测定”，增加“气体燃料用流量计并根据压力……”；

——“5.5.2.2　燃料的取样分析及发热量的测定”，明确了固体燃料、液体燃料及气体燃料发热量的测定一起及计算方法；

——“5.5.3.2　空气温度”增加了“冷风用温度计，热风用热电偶”；

——“5.5.7.3　物料温度”增加了“辐射式高温计”；

——“6.1.3　助燃空气带入的物理热”中，关于“b)对气体燃料空气系数 a，由炉膛烟气分析和燃料成分按下式计算：”，增加了简式计算公式；

——“6.4　热效率”，增加了“设备热效率是指热设备为达到特定目的，供给能量的有效利用程度在数量上的表示，它等于有效能量与供给能量的百分数”。

本标准由中国电器工业协会提出。

本标准由全国工业电热设备标准化技术委员会(SAC/TC 121)归口。

本标准起草单位：西安电炉研究所有限公司、苏州新长光热能科技有限公司、陕西科汇热工技术有限责任公司、国家电炉质量监督检验中心、中国电工技术学会电热专业委员会。

本标准主要起草人：王志超、陈景阁、张建联、余维江、李琨、袁芳兰、张永武、童斌斌。

本标准所代替标准的历次版本发布情况为：

——GB/T 13338—1991。

工业燃料炉热平衡测定与计算基本规则

1 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术语和定义、热平衡和热收支项目、热平衡测定、计算方法以及测定报告的要求。

本标准适用于使用固体、液体和气体燃料的工业炉，如轧钢加热炉、均热炉、热处理炉、冲天炉、步进炉、罩式炉、输送带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”）进行热平衡测定与计算。

注：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在各自的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 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 211 煤中全水分的测定方法
GB/T 212 煤的工业分析方法
GB/T 214 煤中全硫的测定方法
GB/T 218 煤中碳酸盐二氧化碳含量测定方法
GB/T 260 石油产品水含量的测定 蒸馏法
GB/T 384 石油产品热值测定法
GB/T 388 石油产品硫含量测定法（氧弹法）
GB/T 474 煤样的制备方法
GB/T 475 商品煤样人工采取方法
GB/T 476 煤中碳和氢的测定方法
GB/T 508 石油产品灰分测定法
GB/T 1884 石油和液体石油产品密度实验室测定法（密度计法）
GB/T 1885 石油计量表
GB/T 2587 用能设备能量平衡通则

3 术语和定义

GB/T 2587 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

供热期 heating period

自加热开始至完全停止所持续的供热周期。各类间歇式工业炉按 5.2 的要求在各相关标准中具体规定。

3.2

热稳定态 thermal stability

工业炉的一种热学状态，此时输入工业炉体系中的全部热量总和（$\sum Q_r$）等于体系热量支出总和

($\sum Q'_r$)。

3.3

有效热　effective thermal

达到工艺要求理论上所需要消耗的热量。

注：又称“工艺有效热”。

4　热平衡和热收支项目

4.1　热平衡

体系热收入总和($\sum Q_r$)等于体系热支出总和($\sum Q'_r$)，即：$\sum Q_r = \sum Q'_r$。

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_{zw})；

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_{zz})；

h)　其他热收入(Q_{qt})。

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)　机械不完全燃烧热损失(Q'_{fb})；

e)　灰渣带走的物理热(Q'_{hz})；

f)　装料装置带走的物理热(Q'_{zz})；

g)　炉体和其他管道表面散热(Q'_{sr})；

h)　体系的积蓄热(Q'_{xr})；

i)　炉门及孔洞辐射热损失(Q'_{fs})；

j)　炉门及孔洞冒气热损失(Q'_{mq})；

k)　其他工质带走的热量(Q'_{zw})；

l)　其他热支出(Q'_{qt})。

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

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，炉子处于热稳定态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各相关标准中具体规定，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

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各相关标准中具体规定。

5.2.3 热平衡测试

热平衡测试应在完全燃烧的情况下进行。

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，应在各相关标准中明确规定。

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_{dw}^{y}）。

对气体燃料采用湿成份的低（位）发热量（Q_{dw}^{s}）。

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。

5.5 测定项目和测定方法

5.5.1 一般要求

为了求得工业炉热平衡计算中各热收入项和热支出项，一般应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，应在各自的热平衡标准中补充规定。

5.5.2 燃料

5.5.2.1 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。气体燃料用流量计并根据压力、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。

5.5.2.2 燃料的取样分析及发热量的测定

固体燃料用氧弹仪测定，也可按工业分析近似计算燃料发热量，按 GB/T 475、GB 474、GB/T 212、GB/T 476、GB/T 211、GB/T 214 和 GB/T 218 进行工业分析。

液体燃料的发热量用氧弹仪测定，也可用工业分析成分近似计算。液体燃料的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。液体燃料的分析，元素分析可按 GB/T 476 进行，其余按 GB/T 260、GB/T 388、GB/T 508、GB/T 384、GB/T 1884 和 GB/T 1885 进行。

气体燃料的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。气体燃料的成分分析用气体全分析仪进行。气体燃料的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，也可用气体发热量测定仪测定。

5.5.2.3 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。

5.5.3 助燃空气

5.5.3.1 空气量的测定

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。

5.5.3.2 空气温度的测定

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。冷风用温度计，热风用热电偶。

5.5.3.3 空气湿度的测定

用干湿球温度计测相对湿度，再换算成绝对湿度。

5.5.4 其他工质

5.5.4.1 概述

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，在各相关标准中规定。

5.5.4.2 雾化蒸汽

雾化蒸汽的测定方法如下：

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。

5.5.4.3 冷却水

冷却水的测定方法如下：

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。

5.5.4.4 汽化冷却用水

汽化冷却用水的测定方法如下：

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。

5.5.4.5 保护气体

保护气体的测定方法如下：

a) 用量在管道上安装气体流量计测量；
b) 温度：入炉温度采用温度计测定或采用环境温度，出炉温度采用热电偶检测或取测定时加热物料的表面温度。

5.5.5 烟气

5.5.5.1 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。

5.5.5.2 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分析仪。

5.5.5.3 烟气量

可根据燃料用量、成分及空气用量计算烟气量。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。

5.5.5.4 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。

5.5.6 灰渣

5.5.6.1 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，燃料灰分及渣中未燃成分计算得出。

5.5.6.2 灰渣温度测定

灰渣温度用插入式热电偶测定，测多点取平均值。

5.5.6.3 灰渣含碳量测定

灰渣取样按 GB/T 475 并按 GB/T 212 测含碳量。

5.5.7 加热物料

5.5.7.1 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。

5.5.7.2 物料成分

化验或根据有关资料查取。

5.5.7.3 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、辐射式高温计、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。

5.5.8 炉膛温度和压力

5.5.8.1 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。

5.5.8.2 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。

5.5.9 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。

5.5.10 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 5.5.5.2、5.5.8.2 和 5.5.8.1 进行。

6 热平衡计算方法

6.1 热收入项计算

6.1.1 燃料燃烧的化学热通过式(1)或式(2)计算得出：

$$Q_{rh}=BQ_{dw}^{y} \quad \cdots\cdots(1)$$

$$或\ Q_{rh}=BQ_{dw}^{s} \quad \cdots\cdots(2)$$

式中：

Q_{rh}——燃料燃烧的化学热，单位为千焦每小时(kJ/h)；

B——燃料用量，单位为千克每小时(kg/h)或立方米每小时(m^3/h)；

Q_{dw}^{y}——固体或液体燃料应用基低(位)发热量，单位为千焦每千克(kJ/kg)或千焦每立方米(kJ/m^3)；

Q_{dw}^{s}——气体燃料湿成分低(位)发热量，单位为千焦每立方米(kJ/m^3)；

注1：单位“立方米(m^3)”为0 ℃，标准大气压(760毫米汞柱)下测得的气体体积。

气体燃料湿成分低(位)发热量通过式(3)计算：

$$Q_{dw}^{s}=126CO^{s}+108H_2^{s}+234H_2S^{s}+358CH_4^{s}+598C_mH_n^{s} \quad \cdots\cdots(3)$$

式中：

CO^{s}、CH_4^{s}、H_2S^{s}、H_2^{s}、$C_mH_n^{s}$——气体燃料各湿成分的体积分数，%。

注2：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 燃料带入的物理热按式(4)计算：

$$Q_{rw}=BC_rt_r \quad \cdots\cdots(4)$$

式中：

Q_{rw}——燃料带入的物理热，单位为千焦每立方米(kJ/m^3)；

t_r——燃料入炉温度，单位为摄氏度(℃)；

C_r——入炉温度下燃料的平均比热容，单位为千焦每千克摄氏度[kJ/(kg·℃)]或千焦每立方米摄氏度[kJ/(m^3·℃)]。

入炉温度下燃料的平均比热容根据不同的燃料通过式(5)至式(9)计算：

对固体燃料：

$$C_r=C_r^{g}\frac{100-W^{y}}{100}+\frac{4.18W^{y}}{100} \quad \cdots\cdots(5)$$

式中：

C_r^{g}——燃料的干燥基比热容，单位为千焦每千克摄氏度[kJ/(kg·℃)]或千焦每立方米摄氏度[kJ/(m^3·℃)]；

W^{y}——燃料应用基含水量。

对无烟煤、贫煤及油页岩：

$$C_r^{g}=0.92 \quad \cdots\cdots(6)$$

对其他煤种：

$$C_r^{g}=1.09 \quad \cdots\cdots(7)$$

对液体燃料：

$$C_r=1.735+0.002\,5t_r \quad \cdots\cdots(8)$$

对气体燃料：

$$C_r=(C_{co}CO^{s}+C_{CO_2}CO_2^{s}+C_{H_2}H_2^{s}+\cdots)\times\frac{1}{100} \quad \cdots\cdots(9)$$

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，单位为千焦每立方米摄氏度[kJ/(m³ • ℃)]；

气体燃料中水分的体积分数(H_2O^s)按式(10)计算：

$$H_2O^s = \frac{0.124 g_m}{100 + 0.124 g_m} \times 100\% \quad \cdots\cdots (10)$$

式中：

g_m——干气体燃料含水量，单位为克每立方米(g/m³)。

6.1.3 助燃空气带入的物理热按式(11)或式(12)计算：

$$Q_k = V_k C_k t_k \quad \cdots\cdots (11)$$

或

$$Q_k = B \cdot \alpha L_o^s C_k t_k \quad \cdots\cdots (12)$$

式中：

Q_k——助燃空气带入的物理热，单位为千焦每小时(kJ/h)；

V_k——助燃空气实测空气量，单位为立方米每小时(m³/h)；

α ——空气系数；

L_o^s——理论湿空气量，单位为立方米每千克(m³/kg)或立方米每立方米(m³/m³)；

$$L_o^s = L_o^g(1 + 0.000\,124\, g_k) \quad \cdots\cdots (13)$$

式中：

L_o^g——理论干空气量，单位为立方米每千克(m³/kg)或立方米每立方米(m³/m³)；

g_k——干空气的含水量，单位为克每立方米(g/m³)；

t_k ——空气进入体系时的温度，单位为摄氏度(℃)；

C_k——空气在温度 t_k 间的平均比热容，单位为千焦每立方米摄氏度[kJ/(m³ • ℃)]。

空气系数计算如下：

a) 对固体、液体燃料由炉膛烟气成分分析按式(14)和式(15)计算空气系数：

$$\alpha = \frac{N_2^{g'}}{N_2^{g'} - 3.76(O_2^{g'} - 0.5CO^{g'} - 0.5H_2^{g'} - 2CH_4^{g'})} \quad \cdots\cdots (14)$$

$$L_o^s = 0.088\,9C^y + 0.266\,7H^y - 0.033\,3(O^y - S^y) \quad \cdots\cdots (15)$$

式中：

$O_2^{g'}$、$CO^{g'}$、$H_2^{g'}$、$CH_4^{g'}$、$N_2^{g'}$——干烟气中各成分的体积分数，%；

C^y、H^y、O^y、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，可按式(16)或式(17)求出 L_o^g：

对固体燃料，单位为立方米每千克(m³/kg)：

$$L_o^s = 1.01\frac{Q_{dw}^y}{1\,000} + 0.5 \quad \cdots\cdots (16)$$

对液体燃料，单位为立方米每立方米(m³/m³)：

$$L_o^s = 0.85\frac{Q_{dw}^y}{1\,000} + 2 \quad \cdots\cdots (17)$$

b) 对气体燃料空气系数 α，由炉膛烟气分析和燃料成分按式(18)计算：

$$\alpha = \frac{21}{21 - 79\dfrac{O_2^{g'} - 0.5CO^{g'} - 0.5H_2^{g'} - 2CH_4^{g'}}{N_2^{g'} - \dfrac{N_2^s(CO_2^{g'} + CO^{g'} + CH_4^{g'} + SO_2^{g'})}{CO_2^s + CO^s + CH_4^s + mC_mH_n^s + H_2S^s}}} \quad \cdots\cdots (18)$$

也可按烟气成分分析按式(19)和式(20)计算：

$$\alpha=\frac{21}{21-79\dfrac{O_2^{g'}-0.5CO^{g'}}{100-(CO_2^{g'}+CO_2^{g'}+CO^{g'})}} \quad \cdots\cdots(19)$$

$$L_o^R=0.023\,8(H_2^s+CO^s)+0.095\,2CH_4^s+0.047\,6(m+\frac{n}{4})C_mH_n^s+0.071\,4H_2S^s-0.047\,6O_2^s \quad \cdots\cdots(20)$$

式中：

$O_2^{g'}$、$CO^{g'}$、$H_2^{g'}$、$CH_4^{g'}$、$SO_2^{g'}$、$N_2^{g'}$ ——干烟气中各成分的体积分数，%；

N_2^s、CO^s、CH_4^s、$C_mH_n^s$、H_2S^s、H_2^s、O_2^s——燃料的各应用基成分含量，%。

6.1.4 其他工质带入的物理热(Q_{zw})，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 物料带入的物理热按式(21)计算：

$$Q_w=m_wC_wt_w \quad \cdots\cdots(21)$$

式中：

Q_w——物料带入的物理热，单位为千焦每小时(kJ/h)；

m_w——入炉物料的质量，单位为千克每小时(kg/h)；

t_w ——物料入炉温度，单位为摄氏度(℃)；

C_w——物料入炉温度下的平均比热容，单位为千焦每千克摄氏度[kJ/(kg·℃)]。

6.1.6 物料化学反应放热按式(22)计算：

$$Q_h=\sum I_im_i \quad \cdots\cdots(22)$$

式中：

Q_h——物料化学反应放热，单位为千焦每小时(kJ/h)；

m_i——参加反应元素(或化合物)的质量，单位为千克每小时(kg/h)；

I_i ——每千克该元素(或化合物)的反应热，单位为千焦每千克(kJ/kg)。

6.1.7 装料装置带入的物理热按式(23)计算：

$$Q_{zz}=\sum m_{zi}C_{zi}t_{zi} \quad \cdots\cdots(23)$$

式中：

Q_{zz}——装料装置带入的物理热，单位为千焦每小时(kJ/h)；

m_{zi}——各种装置的质量，单位为千克每小时(kg/h)；

C_{zi}——各装置在入炉温度(t_{zi})下的平均比热容，单位为千焦每千克摄氏度[kJ/(kg·℃)]；

t_{zi} ——装料装置入炉温度，单位为摄氏度(℃)。

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、工艺要求等在各自的热平衡标准中具体规定。

6.1.9 热收入项总和按式(24)计算：

$$\sum Q_r=Q_{rh}+Q_{rw}+Q_k+Q_{zw}+Q_w+Q_h+Q_{zz}+Q_{qt} \quad \cdots\cdots(24)$$

式中：

$\sum Q_r$——热收入项总和，单位为千焦每小时(kJ/h)。

6.2 热支出项计算

6.2.1 物料带出的物理热按式(25)计算：

$$Q'_w=m'_wC_wt'_w \quad \cdots\cdots(25)$$

式中：

Q'_w——物料带出的物理热，单位为千焦每小时(kJ/h)；

m'_w——出炉物料的质量，单位为千克每小时(kg/h)；

C_w——物料在出炉温度时的平均比热容，单位为千焦每千克摄氏度[kJ/(kg·℃)]；

t'_w——物料出炉温度，单位为摄氏度(℃)。

6.2.2 物料化学反应吸热(Q'_h)根据物料的组成和化学反应而定，计算方法参见6.1.6。

6.2.3 烟气带走的物理热按式(26)计算：

$$Q'_y = V_y C_y t_y \quad \cdots\cdots (26)$$

式中：

Q'_y——烟气带走的物理热，单位为千焦每小时(kJ/h)；

C_y——燃料在烟气温度(t_y)时的平均比热容，单位为千焦每立方米摄氏度[kJ/(m^3·C)]；

t_y——烟道入口处烟气温度，单位为摄氏度(℃)；

V_y——烟气量，单位为立方米每小时(m^3/h)(实测)。

若烟气量实测有困难，可按式(27)计算：

$$V_y = B(1-K)V_n^s \cdot b - \sum V_{mg} \quad \cdots\cdots (27)$$

式中：

V_n^s——完全燃烧时的实际烟气量，单位为立方米每千克(m^3/kg)或立方米每立方米(m^3/m^3)；

b——不完全燃烧时烟气量修正系数；

当 $a \geqslant 1$ 时，不完全燃烧时烟气量修正系数按式(28)计算：

$$b = \frac{100}{100 - 0.5CO^{g'} - 0.5H_2^{g'}} \quad \cdots\cdots (28)$$

当 $a < 1$ 时，不完全燃烧时烟气量修正系数按式(29)计算：

$$b = \frac{100}{100 + 1.88CO^{g'} + 1.88H_2^{g'} + 9.52CH_4^{g'} - 4.76O_2^{g'}} \quad \cdots\cdots (29)$$

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

Q'_{jb}——机械不完全燃烧热损失。

$\sum V_{mg}$——炉门或窥孔冒气量，单位为立方米每小时(m^3/h)。计算方法见6.2.11。

实际湿烟气量按式(30)～式(35)计算：

a) 对固体和液体燃料

$$V_n^s = V_o + [\alpha(+0.001\,24g_k) - 1]L_o^g + 0.24G_g \quad \cdots\cdots (30)$$

$$V_o = 0.018\,7C^y + 0.112H^y + 0.007S^y + 0.008N^y + 0.012\,4W^y + 0.79L_o^g \quad \cdots\cdots (31)$$

$$L_o^g = 0.089C^y + 0.266\,7H^y - 0.033\,3(O^y - S^y) \quad \cdots\cdots (32)$$

b) 对气体燃料

$$V_n^s = V_o + [\alpha(1 + 0.001\,24g_k) - 1]L_o^g \quad \cdots\cdots (33)$$

$$V_o = 0.01[CO^s + 3CH_4^s + (m + \frac{n}{2})C_mH_n^s + CO_2^s + H_2^s + 2H_2S^s + N_2^s + H_2O^s] + 0.79L_o^g \quad \cdots (34)$$

$$L_o^g = 0.023\,8(H_2^s + CO^s) + 0.095\,2CH_4^s + 0.047\,6(m + \frac{n}{4})C_mH_n^s + 0.071\,4H_2S^s - 0.047\,6O_2^s \quad \cdots\cdots (35)$$

在以上各式中：

V_o ——理论烟气量，单位为立方米每千克（m^3/kg）或立方米每立方米（m^3/m^3）；

L_o^g ——理论干空气量，单位为立方米每千克（m^3/kg）或立方米每立方米（m^3/m^3）；

C^y、H^y、S^y、W^y ——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分数，%；

g_k ——干空气含水量，单位为克每立方米（g/m^3）；

G_g ——每千克液体燃料的雾化蒸汽用量，单位为千克每千克（kg/kg）。

烟气平均比热容按式(36)计算：

$$C_y=\frac{1}{100}\sum Z_{yi}^s\cdot C_{yi}^s \qquad \cdots\cdots(36)$$

式中：

Z_{yi}^s——湿烟气中各成分体积分数，%；

C_{yi}^s——湿烟气中各成分的平均比热容，单位为千焦每立方米摄氏度[kJ/(m³·℃)]。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（$H_2O^{s'}$）按式(37)或式(38)计算：

对固体、液体燃料：

$$H_2O^{s'}=\frac{0.224\left(\frac{H^y}{2}+\frac{W^y}{18}\right)+0.001\,24g_{ra}L_o^g+1.24G_g}{bV_n^s}\times100\% \qquad \cdots\cdots(37)$$

对气体燃料：

$$H_2O^{s'}=\frac{0.01\left(2CH_4^s+H_2^s+\frac{n}{2}C_mH_n^s+H_2S^s\right)+0.001\,24g_{ka}L_o^g}{bV_n^s}\times100\% \qquad \cdots\cdots(38)$$

b） 湿烟气中任意成分按式(39)计算：

$$Z^{s'}=Z^{g'}\cdot\frac{100-H_2O^{s'}}{100}\times100\% \qquad \cdots\cdots(39)$$

式中：

$Z^{s'}$——湿烟气中任意成分，%；

$Z^{g'}$——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按式(40)计算：

$$Q'_{hb}=(1-K)BbV_n^{s'}(126CO^{s'}+108H_2^{s'}+358CH_4^{s'}+589C_mH_n^{s'} \qquad \cdots\cdots(40)$$

式中：

Q'_{hb}——烟气中带走的化学不完全燃烧热损失，单位为千焦每小时（kJ/h）。

6.2.5 机械不完全燃烧热损失按式(41)计算：

$$Q'_{jb}=Q'_z+Q'_c \qquad \cdots\cdots(41)$$

式中：

Q'_{jb}——机械不完全燃烧热损失，单位为千焦每小时（kJ/h）；

Q'_z——灰渣中残碳损失热量，单位为千焦每小时（kJ/h）；

Q'_c——烟气中残碳损失热量，单位为千焦每小时（kJ/h）。

灰渣中残碳损失热量按式(42)计算：

$$Q'_z=33\,907G_{hz}\cdot C_{hz} \qquad \cdots\cdots(42)$$

式中：

Q'_z——灰渣中残碳损失热量，单位为千焦每小时(kJ/h)；

C_{hz}——灰渣中含碳量，%；

G_{hz}——灰渣量，单位为千焦每小时(kg/h)；实测或按式(43)计算：

$$G_{hz}=BA_r^y/A_{hz}^g \quad \cdots\cdots(43)$$

式中：

A_r^y——煤的应用基含灰量，%；

A_{hz}^g——灰渣的干基含水量，%。

烟气中残碳损失热量按式(44)计算：

$$Q'_c=327[B(1-K)V_n^s b-\sum V_{mg}]C_{yq}\times 10^{-6} \quad \cdots\cdots(44)$$

式中：

Q'_c——烟气中残碳损失热量，单位为千焦每小时(kJ/h)；

C_{yq}——烟气中残碳量，单位为毫克每立方米(mg/m³)。

6.2.6 灰渣带出的物理热按式(45)计算：

$$Q'_{hz}=\sum G_{hz}(C_{hz}t_z-C_w t_o) \quad \cdots\cdots(45)$$

式中：

Q'_{hz}——灰渣带出的物理热，单位为千焦每小时(kJ/h)；

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，单位为千焦每千克摄氏度[kJ/(kg·℃)]。

t_z——灰渣温度，单位为摄氏度(℃)。

6.2.7 装料装置带出的物理热按式(46)计算：

$$Q'_{zz}=\sum m_{zi}C'_{zi}t'_{zi} \quad \cdots\cdots(46)$$

式中：

Q'_{zz}——装料装置带出的物理热，单位为千焦每小时(kJ/h)；

m_{zi}——各种装置的质量，单位为千焦每小时(kg/h)；

C'_{zi}——各装置在出炉温度(t'_{zi})时的平均比热容，单位为千焦每千克摄氏度[kJ(/kg·℃)]；

t'_{zi}——各装料装置的出炉温度，单位为摄氏度(℃)。

6.2.8 炉体和其他管道表面散热损失按式(47)或式(48)计算：

对连续式炉：

$$Q'_{sr}=\sum Q_i\cdot A_i \quad \cdots\cdots(47)$$

对间歇式炉：

$$Q'_{sr}=\sum Q_i\cdot A_i\cdot T \quad \cdots\cdots(48)$$

式中：

Q'_{sr}——炉体和其他管道表面散热损失，单位为千焦每小时(kJ/h)；

T——间歇式炉供热周期时间，单位为小时(h)；

A_i——i 部炉体或其他管道表面积，单位为平方米(m²)；

Q_i——i 部炉体或其他管道表面热流密度，单位为千焦每平方米小时[kJ/(m²·h)]。用热流计直接测出。

若不能直接测出热流密度值时，可按式(49)计算：

$$Q_i=20.43\xi\left[\left(\frac{273+t_b}{100}\right)^4-\left(\frac{273+t_o}{100}\right)^4\right]+\alpha_d(t_b-t_o) \quad \cdots\cdots(49)$$

式中：

ξ ——炉体或其他管道表面黑度；

t_b——炉体或其他管道表面温度，单位为摄氏度(℃)；

α_d——对流给热系数，单位为千焦每立方米小时摄氏度[kJ/(m³ · h · ℃)]。

对流给热系数按式(50)至式(53)计算：

无风时，对于：

$$散热面向上\ \alpha_d = 11.7\,(t_b - t_o)^{\frac{1}{4}} \quad \cdots\cdots(50)$$

$$散热面向下\ \alpha_d = 6.3\,(t_b - t_o)^{\frac{1}{4}} \quad \cdots\cdots(51)$$

$$散热面垂直\ \alpha_d = 9.2\,(t_b - t_o)^{\frac{1}{4}} \quad \cdots\cdots(52)$$

$$横置圆柱\ \alpha_d = 8.8\left(\frac{t_b - t_o}{d}\right)^{\frac{1}{4}} \quad \cdots\cdots(53)$$

式中：

D——圆柱外径，单位为米(m)。

当风速 $W_f<5$ m/s 时，对流给热系数按式(54)计算：

$$\alpha_d = 22.2 + 15.1W_f \quad \cdots\cdots(54)$$

当风速 $W_f>5$ m/s 时，对流给热系数按式(55)计算：

$$\alpha_d = 27W_f^{0.8} \quad \cdots\cdots(55)$$

6.2.9 体系的积蓄热按式(56)计算：

$$Q'_{xr} = \sum V_i \rho_i (C_{mi} t_{mi} - C_{si} t_{si}) \quad \cdots\cdots(56)$$

式中：

Q'_{xr} ——体系的积蓄热，单位为千焦每小时(kJ/h)；

V_i ——各部分炉衬体积，单位为立方米(m³)；

ρ_i ——各部分炉衬密度，单位为千克每立方米(kg/m³)；

t_{mi}、t_{si} ——各部分炉衬加热终了和开始加热时的平均温度，单位为摄氏度(℃)；

C_{mi}、C_{si}——各部分炉衬在0℃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，单位为千焦每千克摄氏度[kJ/(kg · ℃)]。

注1：对多层炉衬，各层的平均温度分别计算各层的积蓄热，然后相加。

注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，在各相关标准中明确规定。

注3：连续式炉的积蓄热，一般可略去不计，在特殊情况，可在各自的热平衡标准中规定。

6.2.10 炉门和孔洞辐射热损失按式(57)计算：

$$Q'_{fs} = 20.41\sum A_1 \varphi \tau \left[\left(\frac{t_1 + 273}{100}\right)^4 - \left(\frac{t_n + 273}{100}\right)^4\right] \quad \cdots\cdots(57)$$

式中：

Q'_{fs}——炉门和孔洞辐射热损失，单位为千焦每小时(kJ/h)；

t_1 ——炉温，单位为摄氏度(℃)；

φ ——角度系数；

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

A_1 ——开启炉门面积，单位为平方米(m²)。

6.2.11 炉门及孔洞冒气热损失按式(58)计算：

$$Q'_{mq}=Q'_{ph}+Q'_{ch} \qquad \cdots\cdots(58)$$

式中：

Q'_{mq}——炉门及孔洞冒气热损失，单位为千焦每小时(kJ/h)；

Q'_{ph}——冒气带出的物理热，单位为千焦每小时(kJ/h)；

Q'_{ch}——冒气带出的化学热，单位为千焦每小时(kJ/h)。

冒气带出的物理热按式(59)计算：

$$Q'_{ph}=\sum V_{mq}(C'_y \cdot t'_y - C'_{yo} \cdot t_o) \qquad \cdots\cdots(59)$$

式中：

V_{mq}——冒气量，单位为立方米每小时(m^3/h)；

t'_y——炉门及孔洞处炉气的温度，单位为摄氏度(℃)；

C'_y、C'_{yo}——分别为炉气在 0 ℃至炉气温度(t'_y)及环境温度(t_o)间的平均比热容，单位为千焦每立方米摄氏度[kJ/(m^3 · ℃)]。

冒气量计算如下：

a) 炉门及垂直孔洞的冒气量按式(60)计算：

$$V_{mq}=\left\{\left[\frac{p_1}{9.8}+(r_0-r')H\right]^{3/2}-\left(\frac{p_1}{9.8}\right)^{3/4}\right\}\times\frac{281\mu b\tau\dfrac{p_0+p_1}{9.8}}{(r_0-r')\sqrt{r'}(273+t'_y)} \qquad \cdots\cdots(60)$$

式中：

p_1——炉门、孔洞底部的炉气表压，单位为帕(Pa)；

p_0——大气压，单位为帕(Pa)；

b——炉门、孔洞的平均宽度，单位为米(m)；

τ——炉门、孔洞开启时间，单位为小时(h)；

r_0——环境温度(t_0)下的空气密度，单位为千克每立方米(kg/m^3)，按式(61)计算：

$$r_0=\frac{1.293}{1+\dfrac{t_0}{273}}\times\frac{p_0}{101\ 325} \qquad \cdots\cdots(61)$$

式中：

r'——炉气在 t'_y下的密度，单位为千克每立方米(kg/m^3)，按式(62)计算：

$$r'=\frac{r'_0}{1+\dfrac{t'_y}{273}}\times\frac{p_1+p_0}{101\ 325} \qquad \cdots\cdots(62)$$

式中 r_0'按式(63)计算：

$$r'_0=\frac{44CO_2+18H_2O+64SO_2+28N_2+32O_2+\cdots}{22.4\times100} \qquad \cdots\cdots(63)$$

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

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) 水平孔缝的冒气量按式(64)计算：

$$V_{mq}=\sqrt{\frac{p_1/9.8}{r'}}\cdot\frac{421\mu\tau A\dfrac{p_0+p_1}{}}{273+t'_y} \qquad \cdots\cdots(64)$$

式中：

A——孔缝的冒气面积，单位为平方米(m^2)；

p_1——孔缝处的平均表压，单位为帕(Pa)。

冒气带出的化学热按式(65)计算：

$$Q'_{ch}=\sum V_{mq}(126CO+108H_2+358CH_4+589C_mH_n) \quad \cdots\cdots(65)$$

式中：

Q'_{ch} ——冒气带出的化学热，单位为千焦每小时(kJ/h)；

CO、H_2、CH_4——冒气各成分的体积分数，%。

6.2.12 其他工质带走的热量(Q'_{zw})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($\sum Q'_r$)按式(66)计算：

$$\sum Q'_r=Q'_w+Q'_h+Q'_r+Q'_{hb}+Q'_{jb}+Q'_{hz}+Q'_{zz}+Q'_{sr}+Q'_{xr}+Q'_{fs}+Q'_{mq}+Q'_{zw}+Q'_{qt} \quad \cdots\cdots(66)$$

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	%	序号	项目	热量 kJ/h	%
1	燃料燃烧化学热 Q_{rh}			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_k			3	烟气带走的物理热 Q'_y		
4	其他工质带入的物理热 Q_{zw}			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_{zz}			7	装料装置带出的物理热 Q'_{zx}		
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'_{zr}		
				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'_{zw}		
				13	除以上各项外的其他热支出 Q'_{qt}		
	热收入总和 $\sum Q_r$		100		热支出项总和 $\sum Q'_r$		100

6.4 热效率 η

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。设备热效率是指热设备为达到特定目的，供给能量的有效利用程度在数量上的表示，它等于有效能量与供给能量的百分数，按式(67)或式(68)计算得出：

$$\eta = \frac{Q_{yx}}{Q_{gg}} \times 100 = \left(1 - \frac{Q_{ss}}{Q_{gg}}\right) \quad \cdots\cdots (67)$$

$$或\ \eta = \frac{Q_{yx}}{\sum Q_r} \times 100 = \left(1 - \frac{Q_{yx}}{Q_{rh} + Q_{rw}}\right) \times 100\% \quad \cdots\cdots (68)$$

式中：

η ——设备热效率；

Q_{yx} ——有效能量；

Q_{yx} ——损失热量；

$\sum Q_r$——供给能量(指外界供给体系的能量)。

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；

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)。