



中华人民共和国建材行业标准

JC/T 791—XXXX

轮窑热平衡、热效率测定与计算方法

The method for the measurement and calculation of heat balance,

heat efficiency of annular kilns

(征求意见稿)

XXXX—XX—XX 发布

XXXX—XX—XX 实施

中华人民共和国国家发展和改革委员会
发布

目 次

前言..... III

1 范围..... 1

2 规范性引用文件..... 1

3 条件与基准..... 1

4 热平衡示意图..... 2

5 测定方法..... 2

6 热平衡计算方法..... 5

7 热效率计算方法..... 12

8 热平衡、热效率计算汇总表..... 13

附录 A（资料性附录） 常用物料热平衡计算参数..... 15

前 言

本标准是对 JC/T 791-2007《轮窑热平衡、热效率测定与计算方法》进行了修订。

本标准与 JC/T791-2007 相比，主要变化如下：

——标准的编写格式按照 GB/T1.1-2000《标准化工作导则第1部分：标准的结构与编写规则》的要求进行编写。

——将“6 技术要求”和“7 测定方法”的内容整合为“5 测定方法”。

——完善了“3 条件与基准”的内容。

——调整了热平衡测定周期。

——对取样周期进行了合理的调整

——修正部分计算公式。

——增加“附录 A 常用物料热平衡计算参数”。

本标准自实施之日起，代替 JC/T791-2007《轮窑热平衡、热效率 测定与计算方法》。

本标准由中国建筑材料联合会提出。

本标准由全国墙体屋面及道路用建筑材料标准化技术委员会（SAC/TC 285）归口。

本标准起草单位：中国建材检验认证集团西安有限公司、国家建筑材料工业墙体屋面及道路用建筑材料节能评价检验测试中心

本标准主要起草人：吴冰、王博

本标准所代替标准的历次版本发布情况为：

——GB 6053-85、JC/T791-1985（1996）、JC/T 791-2007

轮窑热平衡、热效率测定与计算方法

1 范围

本标准规定了砖瓦轮窑热平衡、热效率测定的术语与定义、基准、热平衡示意图、测定方法、计算方法及热效率的计算方法。

本标准适用于砖瓦轮窑热平衡、热效率的测定与计算。

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，仅所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 212 煤的工业分析方法

GB/T 213 煤的发热量测定方法

GB/T 16399 粘土化学分析方法

3 条件与基准

3.1 热平衡、热效率测定应在窑炉稳定生产状态下进行，稳定生产状态是指产品质量、产品数量、内燃料掺配量、外燃料消耗量都保持在一个时期（至少 45 天）的平均水平。

3.2 测定周期为 24h。

3.3 温度以环境温度为基准。

3.4 外燃料的发热量以收到基低位发热量为基准，内燃料的发热量以干燥基低位发热量为基准。

3.5 采用单位产品质量（t）为计算基数。

4 热平衡示意图

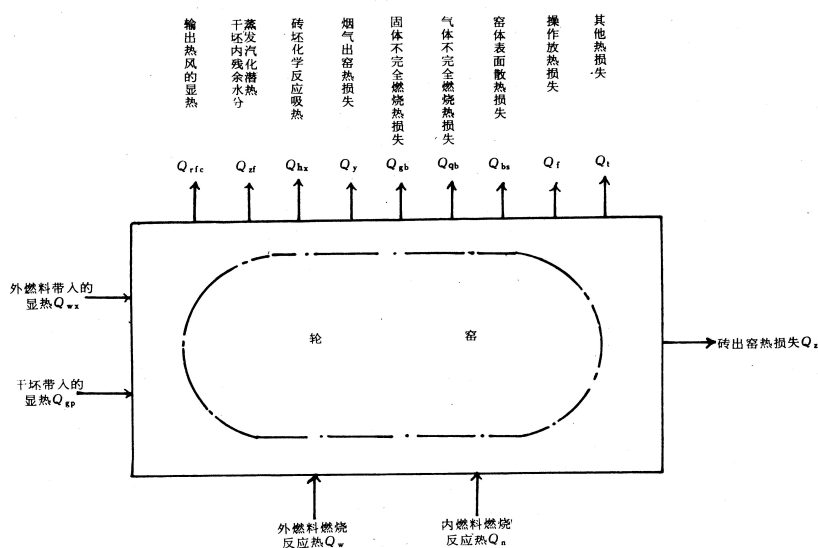


图 1 热平衡示意图

5 测定方法

5.1 测定周期

以任一部火的最高温度点为测定时间起点，测定周期为 24h。

5.2 环境温度

在距离轮窑墙体 5m 左右，高 1m 左右的位置，每隔 4h 测定一次温度，应在早、中、晚至少各测量一次，精确至 0.5℃，或采用当地气象部门同期发布数据。

5.3 大气压

大气压用大气压力计测量或采用当地气象部门同期测量的数据。

5.4 原料

5.4.1 取样

测定期间应准确计量所用原料。原料试样应在混入内燃料之前进行取样，每隔 4h 一次，累计取样次数应不少于 3 次，每次取样 5kg。将所取样品均匀混合后，用四分法缩分留取试样 3kg，精确至 1g。

5.4.2 化学成分

原料中 Al_2O_3 含量按 GB/T 16399 的规定进行。

5.5 内燃料

5.5.1 取样

内燃料应在掺入原料之前进行取样，每隔 4h 一次，累计取样次数应不少于 3 次，每次取样 1kg，将全部样品均匀混合后，用四分法缩分留取试样 1kg，精确至 1g，试样应在密闭容器内保存。

5.5.2 发热量

内燃料干燥基发热量按 GB/T 213 的规定进行。

5.5.3 单位质量（吨）产品对应砖坯中内燃料掺配量

测定期间应准确计量所用内燃料。单位质量（吨）砖坯的内燃料(干燥基)掺配量由测定期间内燃料(干燥基)的累计消耗量（吨）除以对应的原料消耗量（吨）来确定。

5.6 外燃料

5.6.1 取样

在测定周期内，每隔 4h 在投煤处进行取样，累计取样次数不应少于 3 次，每次取样 1kg，将全部样品均匀混合后，用四分法缩分留取试样 1kg，精确至 1g。试样应在密闭容器内保存。

5.6.2 发热量

外燃料收到基发热量按 GB/T 213 的规定进行。

5.6.3 单位质量（吨）产品的外燃料消耗量

测定期间应准确计量所用外燃料。单位质量（吨）产品的外燃料消耗量由测定期间外燃料(收到基)实际消耗量（吨）除以对应的产品质量（吨）来确定。

5.7 灰渣

5.7.1 取样

待测定的窑室出砖后，在测量外燃料消耗量期间的窑室中，分别收集三个窑室内地面上的灰渣（砖渣除外），在现场集中称量，然后用四分法缩分留取试样 1kg，精确至 1g。

5.7.2 固定碳

灰渣空气干燥基固定碳按照 GB/T 212 的规定进行。

5.7.3 单位质量（吨）产品的灰渣生成量

单位质量（吨）产品的灰渣生成量由收集到的灰渣总量（吨）除以对应窑室的产品质量（吨）来确定。

5.8 烟气、热风及其它热源

5.8.1 取样

烟气和热风测定的位置应选择在直风道上且与风机距离大于 3 倍管径长度处。在测定周期内，每隔 4h 测定一次温度、湿度、流速，累计测定次数应不少于 3 次，不同规格的风机应分别测定，根据每次测量结果的平均值计算各次气体散热流量。测量宜采用数字温湿度和风速流量计，温度精确至 0.5℃，湿度精确至 1%RH，流量精确至 1m/s。

5.8.2 气体成分

气体成分用气体分析仪进行测量。

5.9 砖瓦坯与砖瓦

5.9.1 取样

测定周期内，在进窑口和出窑口处每隔 4h 取样一次，累计取样次数不应少于 3 次。

5.9.2 进出窑时的温度与质量

砖瓦坯测试样品应在入窑时进行取样，每次随机抽取五块样品，砖瓦测试样品应在出窑时进行取样，每次随机抽取五块样品，取样后应立即测量所取样品的温度和质量，温度精确至 0.5℃，质量精确至 1g。根据测量结果分别计算砖瓦坯与砖瓦进出窑时的平均温度和平均质量。

5.9.3 砖瓦坯含水率

每次测试完砖瓦坯温度之后，留取两块样品测定其含水率。首先称取砖瓦坯初始质量 m_0 ，然后在 105℃±5℃ 环境下烘至恒质 m_1 （恒质是指在烘干过程中间隔 2h，前后两次称量相差不大于 0.2%），精确至 1g。砖瓦坯含水率计算见公式（1）：

$$W_{gp} = \frac{m_{g0} - m_g}{m_g} \times 100 \quad \dots\dots\dots (1)$$

式中：

W_{gp} ——干坯含水率，单位为质量百分比（%）；

m_{g0} ——干坯初始质量，单位为克（g）；

m_g ——干坯恒质，单位为克（g）。

5.9.4 砖瓦固定碳

将 5.9.2 的砖瓦样品随机抽取 3 块进行粉碎，用四分法缩分并留取试样 1kg，精确至 1g，按 GB/T 212 的规定测定。

5.10 窑体散热损失

5.10.1 测定时间

在测定周期内，每隔 4 h 测定一次，累计测定次数不应少于 3 次。热平衡计算取各次测量数据的平均值。

5.10.2 测点划分

窑体散热应在窑炉的两个最高温度点之间测定，测定前根据温度的变化将窑室外表面划分为若干个矩形面，同一面上各点温度最大值与最小值之差不得大于 3℃，以每个面的中心位置作为测点。

5.10.3 表面散热流量

窑体表面散热流量采用温差法或热流计法。在 5.10.2 选定的测点上进行温度或热流密度的测定，记录各测点的温度或热流密度，根据每次测量结果的平均值计算各次窑体表面散热流量。温度精确至 0.5℃，热流密度精确至 0.1W/m²。

5.11 操作放热损失

5.12 窑门放热损失

5.12.1 测定时间

在测定周期内，每隔 4 h 测定一次，累计测定次数不应少于 3 次。

5.12.2 测点的划分与测量

先测量放热窑门面积，然后在所有放热窑门表面上均匀选择 6~9 个测点，每打开一个窑门，在 30min 内分别测定窑门上所选择测点的温度和流速，根据每次测量结果的平均值计算各次放热窑门表面散热流量。宜采用温度计、数字流量计进行测定，温度精确至 0.5℃，流速精确至 1m/s。

5.13 投煤孔放热损失

5.13.1 测定时间

在测定周期内，每隔 4 h 测定一次，累计测定次数不应少于 3 次。

5.13.2 测点划分与测量

将全部放热投煤孔按照纵向间隔一排的方法确定测点，同时测量投煤孔面积。在每次变换投煤孔后 30min 内测定一次温度、流速，根据每次测量结果的平均值计算各次投煤孔散热流量。宜采用温度计、数字流量计进行测定，温度精确至 0.5℃，流速精确至 1m/s。

5.14 窑内温度

5.14.1 测点划分与测量

窑内温度的测量应在热平衡测试开始后，在窑炉纵向长度上均匀选择测点测量窑内温度，两个最高温度测点之间的测点数量不少于 9 个，温度精确至 1℃。

5.14.2 窑内温度曲线

以长度（时间）为横坐标，以两个最高温度测点之间的测量数据（温度）为纵坐标，绘制窑内温度曲线。

6 热平衡计算方法

6.1 热量输入

6.1.1 内燃料的燃烧反应热 Q_n

$$Q_n = Q_{nDW}^g m_n^g \dots\dots\dots (2)$$

式中：

Q_n ——内燃料的燃烧反应热，单位为千焦（kJ）；

D_{nDW}^g ——内燃料（干燥基）低位发热量，单位为千焦每千克（kJ/kg）；

m_n^g ——吨产品对应的内燃料（干燥基）掺配量，单位为千克（kg）。

6.1.2 外燃料的燃烧反应热 Q_w

$$Q_w = Q_{wDW}^y m_w^y \dots\dots\dots (3)$$

式中:

Q_w ——外燃料的燃烧反应热, 单位为千焦 (kJ);

Q_{wDW}^y ——外燃料 (收到基) 低位发热量, 单位为千焦每千克 (kJ/kg);

m_w^y ——吨产品的外燃料 (收到基) 消耗量, 单位为千克 (kg)。

6.1.3 外燃料带入的显热 Q_{wx}

$$Q_{wx} = m_w^y [(1 - W_w^y) C_w + 4.18 W_w^y] (t_w - t_0) \dots\dots\dots (4)$$

式中:

Q_{wx} ——外燃料带入的显热, 单位为千焦 (kJ);

m_w^y ——吨产品的外燃料 (应用基) 消耗量, 单位为千克 (kg)。

W_w^y ——外燃料 (应用基) 的含水率, 单位为百分比 (%);

C_w ——外燃料的平均比热, 单位为千焦每千克摄氏度[kJ/(kg·℃)];

t_w ——外燃料的平均温度, 单位为摄氏度 (℃);

t_0 ——环境温度, 单位为摄氏度 (℃)。

6.1.4 干坯带入的显热 Q_{gp}

$$Q_{gp} = [(m_{gp} (1 - W_{gp}) - m_n^g) C_{pl} + 4.18 m_{gp} W_{gp} + m_n^g C_n] (t_{gp} - t_0) \dots\dots\dots (5)$$

式中:

Q_{gp} ——干坯带入的显热, 单位为千焦 (kJ);

m_{gp} ——吨产品对应的干坯的质量, 单位为千克 (kg);

W_{gp} ——干坯的残余含水率, 单位为百分比 (%);

m_n^g ——吨产品对应的内燃料 (干燥基) 掺配量, 单位为千克 (kg);

C_{pl} ——干坯原料的平均比热, 单位为千焦每千克摄氏度[kJ/(kg·℃)], 按下式计算:

$$C_{pl} = 0.807 + 313.6 \times 10^{-6} \cdot t_{gp} \dots\dots\dots (6)$$

式中:

C_n ——内燃料的平均比热, 单位为千焦每千克摄氏度[kJ/(kg·℃)];

t_{gp} ——干坯的平均温度, 单位为摄氏度 (℃);

t_0 ——环境温度, 单位为摄氏度 (℃)。

6.1.5 总输入热量 Q_{sr}

$$Q_{sr} = Q_n + Q_w + Q_{wx} + Q_{gp} \dots\dots\dots (7)$$

式中:

Q_{sr} ——总输入热量, 单位为千焦 (kJ);
 Q_n ——内燃料的燃烧反应热, 单位为千焦 (kJ);
 Q_w ——外燃料的燃烧反应热, 单位为千焦 (kJ);
 Q_{wx} ——外燃料带入的显热, 单位为千焦 (kJ);
 Q_{gp} ——干坯带入的显热, 单位为千焦 (kJ)。

6.2 热量输出

6.2.1 干坯内残余水分蒸发汽化潜热 Q_{zf}

$$Q_{zf} = rm_{gp} W_{gp} \dots\dots\dots (8)$$

式中:

Q_{zf} ——干坯内残余水分蒸发汽潜热, 单位为千焦 (kJ);
 r ——水在干坯平均温度下的汽化潜热, 单位为千焦每千克 (kJ/kg);
 m_{gp} ——吨产品对应的干坯的质量, 单位为千克 (kg);
 W_{gp} ——干坯的残余含水率, 单位为百分比 (%)。

6.2.2 砖坯的化学反应热 Q_{hx}

砖坯化学反应吸热应以量热仪实测结果为准, 若条件不具备时暂按下式计算:

$$Q_{hx} = 2091 m_{pl} Al_2O_3 \dots\dots\dots (9)$$

式中:

Q_{hx} ——砖坯的化学反应热, 单位为千焦 (kJ);
2091—— Al_2O_3 的反应热, 单位千焦每千克 (kJ/kg);
 m_{pl} ——吨产品对应的砖坯中原料的质量, 单位为千克 (kg), 按下式计算:

$$m_{pl} = m_{gp} (1 - W_{gp}) - m_n^g \dots\dots\dots (10)$$

Al_2O_3 ——制坯原料中氧化铝的含量, 单位为百分比 (%)。

6.2.3 输出热风的显热 Q_{rfc}

$$Q_{rfc} = \frac{1}{A} [V_{rf} (1 - \Phi_{H_2O_{rf}}) C'_{rf} + V_{rf} \cdot \Phi_{H_2O_{rf}} \cdot C'_{H_2O}] \cdot (t_{rf} - t_0) \dots\dots\dots (11)$$

式中:

Q_{rfc} ——输出热风的显热, 单位为千焦 (kJ);
 A ——窑炉单位小时产量, 单位为吨 (t);

V_{rf} ——输出热风的流量，单位为立方米每小时（ m^3/h ）；

$\Phi_{H_2O_{rf}}$ ——热风中水蒸汽的容积百分数，单位为百分比（%）；

C'_{H_2O} ——水蒸汽的平均容积比热，单位为千焦每立方米摄氏度 $[\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})]$ ；

t_{rf} ——热风的平均温度，单位为摄氏度（ $^\circ\text{C}$ ）；

C'_{rf} ——干热风的平均容积比热，单位为千焦每立方米摄氏度 $[\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})]$ ，按下式计算：

$$C'_{rf} = \varphi\text{CO}_{2rf} C_{co_2} + \varphi\text{CO}_{rf} C_{co} + \varphi\text{N}_{2rf} C_{N_2} + \varphi\text{O}_{2rf} C_{o_2} \dots\dots\dots (12)$$

式中：

φCO_{2rf} 、 φCO_{rf} 、 φN_{2rf} 、 φO_{2rf} ——干热风中二氧化碳、一氧化碳、氮、氧的容积百分数，单位为百分比（%）。

C_{co_2} 、 C_{co} 、 C_{N_2} 、 C_{o_2} ——被测气体中二氧化碳、一氧化碳、氮、氧的平均容积比热，单位为千焦每立方米摄氏度 $[\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})]$ 。

6.2.4 烟气出窑热损失 Q_y

$$Q_y = \frac{1}{A} [V_y (1 - \Phi_{H_2O_y}) C'_y + V_y \cdot \Phi_{H_2O_y} \cdot C'_{H_2O}] \cdot (t_y - t_0) \dots\dots\dots (13)$$

式中：

Q_y ——烟气出窑热损失，单位为千焦（ kJ ）；

A ——窑炉单位小时产量，单位为吨（ t ）；

V_y ——出窑烟气的流量，单位为立方米每小时（ m^3/h ）；

C'_y ——干烟气的平均容积比热，单位为千焦每立方米摄氏度 $[\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})]$ ，计算方法同 6.2.3；

$\Phi_{H_2O_y}$ ——烟气中水蒸汽的容积百分数，单位为百分比（%）；

t_y ——烟气的平均温度，单位为摄氏度（ $^\circ\text{C}$ ）；

t_0 ——环境温度，单位为摄氏度（ $^\circ\text{C}$ ）。

6.2.5 砖出窑热损失 Q_z

$$Q_z = m_z C_z (t_z - t_0) \dots\dots\dots (14)$$

式中：

Q_z ——砖出窑热损失，单位为千焦（ kJ ）；

m_z ——吨产品的质量，单位为千克（ kg ）；

C_z ——砖的平均比热，单位为千焦每千克摄氏度（ $\text{kJ}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}$ ），计算方法同 6.1.4；

t_z ——砖出窑时的平均温度，单位为摄氏度（ $^\circ\text{C}$ ）；

t_0 ——环境温度，单位为摄氏度（℃）。

6.2.6 固体不完全燃烧的热损失 Q_{gb}

$$Q_{gb} = 338.71(m_{hu}C_{hu} + m_zC_z) \dots\dots\dots (15)$$

式中：

Q_{gb} ——固体不完全燃烧的热损失，单位为千焦（kJ）；

m_{hu} ——生产吨产品产生的灰渣质量，单位为千克（kg）；

C_{hu} ——灰渣内残余含碳率，单位为百分比（%）；

C_z ——出窑砖内残余含碳率，单位为百分比（%）。

6.2.7 气体不完全燃烧的热损失 Q_{qb}

$$Q_{qb} = \frac{1.26}{A} [V_y(1 - \Phi_{H_2Oy})\Phi_{coy} + V_{rf}(1 - \Phi_{H_2O_{rf}}) \cdot \Phi_{CO_{rf}}] \dots\dots\dots (16)$$

式中：

Q_{qb} ——气体不完全燃烧的热损失，单位为千焦（kJ）；

A ——窑炉单位小时产量，单位为吨（t）；

V_y ——出窑烟气的流量，单位为立方米每小时（m³/h）；

Φ_{H_2Oy} ——烟气中水蒸汽的容积百分数，单位为百分比（%）；

Φ_{coy} ——干烟气中一氧化碳的容积百分数，单位为百分比（%）；

V_{rf} ——输出热风的流量，单位为立方米每小时（m³/h）；

$\Phi_{H_2O_{rf}}$ ——热风中水蒸汽的容积百分数，单位为百分比（%）；

$\Phi_{CO_{rf}}$ ——干热风中一氧化碳的容积百分数，单位为百分比（%）。

6.2.8 窑体表面散热损失 Q_{bs}

6.2.8.1 第 i 次测得的室体表面综合换热系数 a_{bi}

$$a_{bi} = K(t_{bi} - t_{ki})^{0.25} + \frac{20.41\varepsilon \left[\left(\frac{t_{bi} + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_{ki} + 273}{100} \right)^4 \right]}{t_{bi} - t_{ki}} \dots\dots\dots (17)$$

式中：

a_{bi} ——第 i 次测得的室体表面综合换热系数，单位为千焦每平方米小时摄氏度[kJ / (m²·h·℃)]；

K ——决定于散热面位置的系数。干燥室侧墙取 9.20，干燥室顶面取 11.71；

t_{bi} ——第 i 次测得的室体表面温度，单位为摄氏度（℃）；

t_{ki} ——第 i 次测得的室体周围空间温度，单位为摄氏度（℃）；

ε ——室体表面黑度，见附表。

6.2.8.2 第 i 次测得的窑体表面平均散热流量

$$Q_{bsi} = \frac{q_{b1}F_{b1} + q_{b2}F_{b2} + \cdots + q_{bi}F_{bi}}{F_{b1} + F_{b2} + \cdots + F_{bi}} \quad (18)$$

$$\text{或 } Q_{bsi} = \frac{a_{b1}(t_{b1} - t_{k1})F_{b1} + a_{b2}(t_{b2} - t_{k2})F_{b2} + \cdots + a_{bi}(t_{bi} - t_{ki})F_{bi}}{F_{b1} + F_{b2} + \cdots + F_{bi}} \quad (19)$$

式中：

Q_{bsi} ——第 i 次测得的室体表面平均散热流量，单位为千焦每小时平方米 $[\text{kJ}/(\text{h} \cdot \text{m}^2)]$ ；

q_{b1} 、 q_{b2} 、 \cdots 、 q_{bi} ——分别表示第 i 次用热流计测得的各个测点的热流值，单位为千焦每小时平方米 $[\text{kJ}/(\text{h} \cdot \text{m}^2)]$ ；

F_{b1} 、 F_{b2} 、 \cdots 、 F_{bi} ——分别表示各个测点所在矩形面积，单位为平方米 (m^2)；

a_{b1} 、 a_{b2} 、 \cdots 、 a_{bi} ——分别表示第 i 次测得的各个测点的窑体表面综合换热系数，单位为千焦每平方米小时摄氏度 $\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$ ；

t_{b1} 、 t_{b2} 、 \cdots 、 t_{bi} ——分别表示第 i 次测得的各个测点的窑体表面温度，单位为摄氏度 ($^\circ\text{C}$)；

t_{k1} 、 t_{k2} 、 \cdots 、 t_{ki} ——分别表示第 i 次测得的各个测点的窑体周围空间温度，单位为摄氏度 ($^\circ\text{C}$)。

6.2.8.3 窑体表面散热损失 Q_{bs}

$$Q_{bs} = \frac{F_b}{n \cdot A} \cdot \sum_{i=1}^n Q_{bsi} \quad (20)$$

式中：

Q_{bs} ——窑体表面散热损失，单位为千焦 (kJ)；

F_b ——窑体散热面积，单位为平方米 (m^2)；

n ——窑体表面散热测定次数；

A ——窑炉单位小时产量，单位为吨 (t)。

6.2.9 操作放热损失 Q_f

6.2.9.1 窑门放热气体的平均放热量 Q_{mf}

6.2.9.1.1 第 i 次测得的窑门放热气体的平均放热量 Q_{mfi}

$$Q_{mfi} = \frac{3600}{A} \cdot \omega_{fi} F_{fi} \cdot C'_{fi} (t_{fi} - t_0) \quad (21)$$

式中：

Q_{mfi} ——第 i 次测得的窑门放热气体的平均放热量，单位为千焦 (kJ)；

A ——窑炉单位小时产量，单位为吨 (t)；

ω_{fi} ——第*i*次测得的窑门放热气体的平均流速，单位为标立方米每秒（m/s）；

F_{fi} ——第*i*次测得的放热窑门的总面积，单位为平方米（m²）；

C'_{fi} ——第*i*次测得的放热气体的平均容积比热，单位为千焦每标立方米（kJ/m³）；

t_{fi} ——第*i*次测得的放热气体的平均温度，单位为摄氏度（℃）；

t_0 ——环境温度，单位为摄氏度（℃）。

6.2.9.1.2 窑门放热损失 Q_{mf}

$$Q_{mf} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n Q_{mfi} \dots\dots\dots (22)$$

式中：

Q_{mf} ——窑门放热损失，单位为千焦（kJ）；

Q_{mfi} ——第*i*次测得的窑门平均放热量，单位为千焦（kJ）；

n ——窑门放热测定次数。

6.2.9.2 投煤孔放热气体的平均放热量 Q_{kf}

6.2.9.2.1 第*i*次测得的投煤孔放热气体的平均放热量 Q_{kfi}

$$Q_{kfi} = \frac{3600}{A} \cdot \omega_{fi} F_{fi} \cdot C'_{fi} (t_{fi} - t_0) \dots\dots\dots (21)$$

式中：

Q_{kfi} ——第*i*次测得的投煤孔放热气体的平均放热量，单位为千焦（kJ）；

A ——窑炉单位小时产量，单位为吨（t）；

ω_{fi} ——第*i*次测得的投煤孔的放热气体的平均流速，单位为立方米每秒（m/s）；

F_{fi} ——第*i*次测得的投煤孔的总面积，单位为平方米（m²）；

C'_{fi} ——第*i*次测得的放热气体的平均容积比热，单位为千焦每立方米（kJ/m³）；

t_{fi} ——第*i*次测得的放热气体的平均温度，单位为摄氏度（℃）；

t_0 ——环境温度，单位为摄氏度（℃）。

6.2.9.2.2 投煤孔放热损失 Q_{kf}

$$Q_{kf} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n Q_{kfi} \dots\dots\dots (23)$$

式中：

Q_{kf} ——投煤孔放热损失，单位为千焦（kJ）；

Q_{kfi} ——第*i*次测得的投煤孔平均放热量，单位为千焦（kJ）；

n ——投煤孔放热测定次数。

6.2.9.3 操作放热损失 Q_f

$$Q_f = Q_{mf} + Q_{kf} \dots\dots\dots (24)$$

式中:

Q_f ——操作放热损失, 单位千焦 (kJ);

Q_{mf} ——窑门放热损失, 单位为千焦 (kJ);

Q_{kf} ——投煤孔放热损失, 单位为千焦 (kJ)。

6.2.10 其他热损失 Q_t

$$Q_t = Q_{sr} - (Q_{zf} + Q_{hx} + Q_{rfc} + Q_y + Q_z + Q_{gb} + Q_{qb} + Q_{bs} + Q_f) \dots\dots\dots (25)$$

式中:

Q_{sr} ——总输入热量, 单位为千焦 (kJ);

Q_{zf} ——干坯内残余水分蒸发汽潜热, 单位为千焦 (kJ);

Q_{hx} ——砖坯的化学反应吸热, 单位为千焦 (kJ);

Q_{rfc} ——输出热风的显热, 单位为千焦 (kJ);

Q_y ——烟气出窑热损失, 单位为千焦 (kJ);

Q_z ——砖出窑热损失, 单位为千焦 (kJ);

Q_{gb} ——固体不完全燃烧的热损失, 单位为千焦 (kJ);

Q_{qb} ——气体不完全燃烧的热损失, 单位为千焦 (kJ);

Q_{bs} ——窑体表面散热损失, 单位为千焦 (kJ);

Q_f ——操作放热损失, 单位千焦 (kJ)。

6.2.11 总输出热量 Q_{sc}

$$Q_{sc} = Q_{zf} + Q_{hx} + Q_{rfc} + Q_y + Q_z + Q_{gb} + Q_{qb} + Q_{bs} + Q_f + Q_t) \dots\dots\dots (26)$$

式中:

Q_{sc} ——总输出热量, 单位为千焦 (kJ)。

其它字母表示同 6.2.10。

7 热效率计算方法

7.1 供给热量

$$Q_{gg} = Q_n + Q_w \dots\dots\dots (27)$$

式中:

Q_{gg} ——供给热量, 单位为千焦 (kJ);

Q_n ——内燃料的燃烧反应热, 单位为千焦 (kJ);

Q_w ——外燃料的燃烧反应热, 单位为千焦 (kJ)。

入窑干坯和外燃料若用外热源从基准温度加热到入窑温度时，供给热量应加上砖坯和外燃料的显热。

7.2 有效热 Q_{yx}

7.2.1 排除干坯残余水水消耗的显、潜热 Q_{ps}

$$Q_{ps} = m_{zf} (r + C_{H2Ops} (t_y - t_{gp})) \dots\dots\dots (28)$$

式中：

Q_{ps} ——排除干坯残余水水消耗的显、潜热，单位为千焦（kJ）；

C_{H2Ops} ——水蒸汽在干坯温度与烟气温度范围内的平均质量比热，单位为千焦每千克摄氏度[kJ/(kg·℃)]；

t_y ——烟气的平均温度，单位为摄氏度（℃）；

t_{gp} ——干坯的平均温度，单位为摄氏度（℃）。

7.2.2 砖坯的化学反应热 Q_{hx}

计算见 6.2.2。

7.3 有效热 Q_{yx}

$$Q_{yx} = Q_{ps} + Q_{hx} \dots\dots\dots (29)$$

式中：

Q_{yx} ——有效热，单位为千焦（kJ）；

Q_{ps} ——排除干坯残余水水消耗的显、潜热，单位为千焦（kJ）；

Q_{hx} ——砖坯的化学反应热，单位为千焦（kJ）。

7.4 热效率 η

$$\eta = \frac{Q_{yx}}{Q_{gg}} \times 100 \dots\dots\dots (30)$$

式中：

Q_{yx} ——有效热，单位为千焦（kJ）；

Q_{gg} ——供给热量，单位为千焦（kJ）。

8 热平衡、热效率计算汇总表

热平衡、热效率计算结果汇总表

序号	热 量 收 入				热 量 支 出			
	项 目	数 值		百分数	项 目	数 值		百分数
		10 ⁴ kJ	10 ⁴ kcal			10 ⁴ kJ	10 ⁴ kcal	
1	内燃料的燃烧反应热 Q_n				干坯内残余水分蒸发汽化热 Q_{zf}			
2	外燃料的燃烧反应热 Q_w				砖坯的化学反应吸热 Q_{hx}			
3	外燃料带入的显热 Q_{wx}				热风输出显热 Q_{rfe}			
4	入窑干坯带入的显热 Q_{gp}				烟气出窑热损失 Q_y			

5					砖出窑热损失 Q_z			
6					固体不完全燃烧热损失 Q_{gb}			
7					气体不完全燃烧热损失 Q_{qb}			
8					窑体表面散热损失 Q_{bs}			
9					风机散热损失 Q_f			
10					其他热损失 Q_i			
11	合 计			100	合 计			100
有效热量 Q_{yx} , 10^4kJ (10^4kcal)								
热效率 η , %								

附录 A
(资料性附录)
常用物料热平衡计算参数

A.1 部分材料比热容见表A.1。

部分材料比热容见表A.1。

表 A.1 部分材料比热容

序号	材料名称	干密度 (kg/m3)	比热容 (kJ/kg·℃)
1	锅炉渣	1000	0.92
2	粉煤灰	1000	0.92
3	高炉矿渣	900	0.92
4	浮石	600	0.92
5	膨胀蛭石	300	1.05
		200	1.05
6	硅藻土	200	0.92
7	膨胀珍珠岩	120	1.17
		80	1.17
8	木屑	250	2.01
9	稻壳	120	2.01
10	干草	100	2.01
11	夯实粘土	2000	1.01
		1800	1.01
12	加草粘土	1600	1.01
		1400	1.01
13	轻质粘土	1200	1.01

A.2 几种煤的平均比热

几种煤的平均比热见表A.2。

表 A.2 几种煤的平均比热

单位为 kJ/kg·℃

种类	泥煤	褐煤	长焰煤	粉煤灰	气煤	肥煤
----	----	----	-----	-----	----	----

平均比热	1.338	1.422	1.305	0.753	1.263	1.213
种类	瘦煤	烟煤	无烟煤	煤渣	焦炭	
平均比热	1.116	1.300	0.836	0.836	0.836	

A.3 水的平均比热

水的平均比热见表A.3。

表 A.3 水的平均比热

温度（℃）	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
比热（kJ/kg·℃）	4.211	4.191	4.183	4.175	4.175	4.175	4.178	4.187	4.194	4.207

A.4 水在不同温度下的汽化潜热

水在不同温度下的汽化潜热表A.4。

表 A.4 水在不同温度下的汽化潜热

温度(℃)	汽化潜热 (kJ/kg)	温度（℃）	汽化潜热 (kJ/kg)	温度（℃）	汽化潜热 (kJ/kg)	温度（℃）	汽化潜热 (kJ/kg)
0	2501.6	30	2430.7	60	2358.6	90	2283.2
1	2499.2	31	2428.3	61	2356.2	91	2280.6
2	2496.8	32	2425.9	62	2353.7	92	2278.0
3	2494.5	33	2423.6	63	2351.3	93	2275.4
4	2492.1	34	2421.2	64	2348.8	94	2272.8
5	2489.7	35	2418.8	65	2346.3	95	2270.2
6	2487.4	36	2416.4	66	2343.9	96	2267.5
7	2485.0	37	2414.1	67	2341.4	97	2264.9
8	2482.6	38	2411.7	68	2338.9	98	2262.2
9	2480.3	39	2409.3	69	2336.4	99	2259.6
10	2477.9	40	2406.9	70	2334.0	100	2256.9
11	2475.5	41	2404.5	71	2331.5	101	2254.3
12	2473.2	42	2402.1	72	2329.0	102	2251.6
13	2470.8	43	2399.7	73	2326.5	103	2248.9
14	2468.5	44	2397.3	74	2324.0	104	2246.3
15	2466.1	45	2394.9	75	2321.5	105	2243.6
16	2463.8	46	2392.5	76	2318.9	106	2240.9
17	2461.4	47	2390.1	77	2316.4	107	2238.2
18	2459.0	48	2387.7	78	2313.9	108	2235.4
19	2456.7	49	2385.3	79	2311.4	109	2232.7
20	2454.3	50	2382.9	80	2308.8	110	2230.0

21	2452.0	51	2380.5	81	2306.3	111	2227.3
22	2449.6	52	2378.1	82	2303.8	112	2224.5
23	2447.2	53	2375.7	83	2301.2	113	2221.8
24	2444.9	54	2373.2	84	2298.7	114	2219.0
25	2442.9	55	2370.8	85	2296.5	115	2216.2
26	2440.2	56	2368.4	86	2293.1	116	2213.4
27	2437.8	57	2365.9	87	2290.9	117	2210.7
28	2435.4	58	2363.5	88	2288.4	118	2207.9
29	2433.1	59	2361.1	89	2285.8	119	2205.1

A.5 各种气体的平均定压比热容

各种气体的平均定压比热容见表A.5。

表 A.5 水的平均比热

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

温度, $^\circ\text{C}$	H_2	N_2	CO	O_2	H_2O	CO_2	干空气	湿空气	H_2S	SO_2
0	1.277	1.299	1.302	1.308	1.491	1.597	1.301	1.325	1.516	1.777
100	1.290	1.301	1.302	1.319	1.502	1.697	1.305	1.329	1.541	1.860
200	1.298	1.303	1.310	1.337	1.517	1.793	1.310	1.334	1.574	1.935
300	1.302	1.308	1.319	1.358	1.538	1.877	1.318	1.343	1.608	2.011
400	1.302	1.317	1.331	1.363	1.559	1.923	1.330	1.355	1.645	2.069
500	1.306	1.329	1.344	1.400	1.583	1.998	1.344	1.370	1.683	2.123
600	1.310	1.342	1.361	1.419	1.608	2.052	1.358	1.384	1.721	2.169
700	1.315	1.355	1.373	1.437	1.634	2.098	1.372	1.398	1.758	2.207
800	1.319	1.368	1.390	1.453	1.660	2.140	1.386	1.413	1.796	2.236
900	1.323	1.382	1.403	1.466	1.686	2.178	1.399	1.426	1.830	
1000	1.327	1.394	1.415	1.480	1.713	2.215	1.412	1.439	1.863	

A.6 灰渣的平均比热容

灰渣的平均比热容见表A.6。

表 A.6 灰渣的平均比热容

温度 ($^\circ\text{C}$)	100	200	300	400	500	600	700	800	900
比热 ($\text{kJ}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}$)	0.762	0.796	0.829	0.863	0.896	0.930	0.963	0.992	1.022

A.7 金属平均比热容

金属平均比热容见表A.7。

表 A.7 金属平均比热容

单位为 kJ/kg·℃

<div>温度 ℃ 材料</div>	0-200	0-400	0-600	0-800	0-1000
低碳钢	0.502	0.519	0.590	0.703	0.695
铸铁	0.490	0.536	0.595	0.691	0.712

A.8 部分材料的辐射黑度

部分材料的辐射黑度见表A.8。

表 A.8 部分材料的辐射黑度

材料名称	耐火砖	钢板	红砖	铁板（已生锈）	铸铁（已氧化）	抹灰砖砌体
黑度ε	0.71~0.85	0.80	0.93	0.685	0.89	0.94

A.9 常用各种能源平均折算热量及折标准煤参考系数

常用各种能源平均折算热量及折标准煤参考系数见表A.9。

表 A.9 常用各种能源平均折算热量及折标准煤参考系数

能源名称	平均低位发热量	折标准煤系数
原煤	20934kJ/kg	0.7143kgce/kg
洗精煤	263477kJ/kg	0.9000kgce/kg
其它洗煤	8374 kJ/kg	0.2850kgce/kg
焦炭	28470 kJ/kg	0.9714kgce/kg
原油	41868 kJ/kg	1.4286kgce/kg
燃料油	41868 kJ/kg	1.4286kgce/kg
汽油	43124 kJ/kg	1.4714kgce/kg
煤油	43124 kJ/kg	1.4714kgce/kg
柴油	42705 kJ/kg	1.4571kgce/kg
煤焦油	33494 kJ/kg	1.1429kgce/kg
粗苯	41816 kJ/kg	1.4286kgce/kg

液化石油气		50241 kJ/kg	1.7143kgce/kg
炼厂干气		46055 kJ/kg	1.5714kgce/kg
油田天然气		38979 kJ/m ³	1.3300kgce/m ³
气田天然气		35588 kJ/m ³	1.2143kgce/m ³
煤矿瓦斯气		14654kJ/m ³ ~16747kJ/m ³	0.5000kgce/m ³ ~0.5714kgce/m ³
焦炉煤气		18003kJ/m ³	0.6143kgce/m ³
其他 煤气	a)发生炉煤气	5234kJ/m ³	0.1786kgce/m ³
	b)重油催化裂解煤气	19259kJ/m ³	0.6571kgce/m ³
	c)重油热裂解煤气	35588kJ/m ³	1.2143kgce/m ³
	d)焦炭制气	150729kJ/m ³	0.5571kgce/m ³
	e)压力汽化煤气	18003kJ/m ³	0.5143kgce/m ³
	f)水煤气	10467kJ/m ³	0.3571kgce/m ³
电力（当量）		3601kJ/(kW.h)	0.1229kgce/(kW.h)
氢气（标况）		10802kJ/m ³	0.3686kgce/m ³
热力（当量）		—	0.03412MJ

A.10 常用耗能工质平均折算热量及折标准煤参考系数

常用耗能工质平均折算热量及折标准煤参考系数见表A.10。

表 A.10 常用耗能工质平均折算热量及折标准煤参考系数

耗能工质名称	平均低位发热量	折标准煤系数
外购水	2.51MJ/t	0.0857kgce/t
软水	14.23MJ/t	0.4857kgce/t
除氧水	28.45MJ/t	0.9714kgce/t
压缩空气（标况）	1.17MJ/m ³	0.0400kgce/m ³
鼓风（标况）	0.88MJ/m ³	0.0300kgce/m ³
氧气（标况）	11.72MJ/m ³	0.4000kgce/m ³
氮气（标况）	19.66MJ/m ³	0.6714kgce/m ³
二氧化碳（标况）	6.28MJ/m ³	0.2143kgce/m ³
蒸气（低压）	3765.60MJ/t	128.6kgce/t

A.11 常用气体的密度

常用气体的密度见表A.11。

表 A.11 常用气体的密度

单位为 kg/m^3

名 称	化 学 式	密 度, ρ_0
干空气	—	1.293
氧	O ₂	1.429
氮	N ₂	1.251
氢	H ₂	0.090
二氧化碳	CO ₂	1.997
一氧化碳	CO	1.250
二氧化硫	SO ₂	2.926
水蒸汽	H ₂ O	0.804

A.12 各温度下饱和水蒸汽的分压Ps

各温度下饱和水蒸汽的分压Ps见表A.12。

表 A.12 各温度下饱和水蒸汽的分压 Ps

温度 (°C)	p_s (Pa)	温度 (°C)	p_s (Pa)	温度 (°C)	p_s (Pa)
-15	165.1	25	3 165.2	65	24 988
-10	259.7	30	4 240.2	70	31 136
-5	400.9	35	5 919.3	75	38 520
0	610.2	40	7 371.4	80	47 314
5	871.8	45	9 577.5	85	57 771
10	1 227.0	50	12 326	90	70 050
15	1 702.1	55	15 727	95	84 476
20	2 826.3	60	19 903	100	101 325

A.13 燃料基准的换算系数

燃料基准的换算系数见表A.13。

表 A.13 燃料基准的换算系数
(适用于除水分以外的各种成分及高位发热量的换算)

已知的“基”	所要换算的基			
	应用基	分析基	干燥基	可燃基
应用基	1	$\frac{100 - W^f}{100 - W^y}$	$\frac{100}{100 - W^y}$	$\frac{100}{100 - (W^y + A^y)}$
分析基	$\frac{100 - W^y}{100 - W^f}$	1	$\frac{100}{100 - W^f}$	$\frac{100}{100 - (W^f + A^f)}$
干燥基	$\frac{100 - W^y}{100}$	$\frac{100 - W^f}{100}$	1	$\frac{100}{100 - A^g}$
可燃基	$\frac{100 - (W^y + A^y)}{100}$	$\frac{100 - (W^f + A^f)}{100}$	$\frac{100 - A^g}{100}$	1