



中华人民共和国国家标准

GB/T 26281—2010

水泥回转窑热平衡、热效率、 综合能耗计算方法

Calculating methods for heat balance, heat efficiency and comprehensive energy
consumption of cement rotary kiln

2011-01-14 发布

2011-11-01 实施



中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局 发布
中国国家标准化管理委员会

前 言

本标准按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本标准由中国建筑材料联合会提出。

本标准由全国水泥标准化技术委员会(SAC/TC 184)归口。

本标准起草单位：天津水泥工业设计研究院有限公司。

本标准主要起草人：刘继开、陶从喜、肖秋菊、倪祥平、王仲春、彭学平。

水泥回转窑热平衡、热效率、 综合能耗计算方法

1 范围

本标准规定了生产硅酸盐水泥熟料的各种类型回转窑(包括预热、烧成及冷却系统)的术语和定义、计算依据和计算基准、回转窑系统平衡计算、冷却机的热平衡与热效率计算等内容。

本标准适用于生产硅酸盐水泥熟料的各种类型回转窑(包括预热、烧成及冷却系统)的热平衡、热效率及熟料烧成综合能耗的计算。采用废弃物作为替代原料和替代燃料时热平衡、热效率及熟料烧成综合能耗计算方法可参考本标准进行。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件,仅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 2587 用能设备能量平衡通则

GB/T 2589 综合能耗计算通则

GB/T 26282—2010 水泥回转窑热平衡测定方法

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

熟料烧成综合能耗 comprehensive energy consumption of clinker burning

熟料烧成综合能耗指烧成系统在标定期限内,生产每吨熟料实际消耗的各种能源实物量按规定的计算方法和单位分别折算成标准煤量的总和,单位为千克(kg)。

3.2

熟料烧成热耗 heat consumption of clinker burning

熟料烧成热耗指单位熟料产量下消耗的燃料燃烧热,单位为千焦每千克(kJ/kg)。

3.3

回转窑系统热效率 heat efficiency of rotary kiln system

回转窑系统热效率指单位质量熟料的形成热与燃料(包括生料中可燃物质)燃烧放出热量的比值,以百分数表示(%)。

4 计算依据和计算基准

4.1 计算依据

根据热平衡参数测定结果计算,热平衡参数的测试按 GB/T 26282—2010 规定的方法进行。窑系统的主要设备情况及热平衡测定结果记录表参见附录 A。

4.2 计算基准

温度基准:0℃;质量基准:1 kg 熟料。

5 回转窑系统平衡计算

5.1 物料平衡

5.1.1 物料平衡范围

物料平衡计算的范围是从冷却机熟料出口到预热器废气出口(即包括冷却机、回转窑、分解炉和预热器系统)并考虑了窑灰回窑操作的情况。物料平衡范围见图1。对不带预热器、分解炉、没有窑中喂料的情况,则计算项目中相关参数视为零。对带余热锅炉的窑,余热锅炉部分的热平衡计算不列在本标准中,可参阅锅炉的有关标准计算。

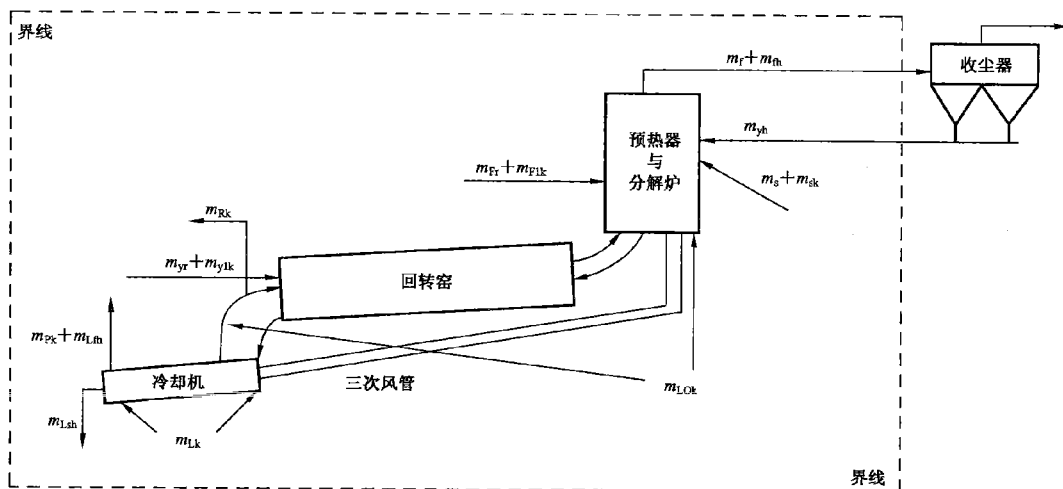


图 1 物料平衡范围试验图

5.1.2 收入物料

5.1.2.1 燃料消耗量

5.1.2.1.1 固体或液体燃料消耗量

固体或液体燃料消耗量计算公式见式(1):

$$m_r = \frac{M_{yr} + M_{Fr}}{M_{sh}} \dots\dots\dots (1)$$

式中:

m_r ——每千克熟料燃料消耗量,单位为千克每千克(kg/kg);

M_{yr} ——每小时入窑燃料量,单位为千克每小时(kg/h);

M_{Fr} ——每小时入分解炉燃料量,单位为千克每小时(kg/h);

M_{sh} ——每小时熟料产量,单位为千克每小时(kg/h)。

5.1.2.1.2 气体燃料消耗量

气体燃料消耗量计算公式见式(2), 气体燃料的标况密度计算公式见式(3):

$$m_r = \frac{V_r}{M_{sh}} \times \rho_r \quad \dots\dots\dots(2)$$

式中:

V_r ——每小时气体燃料消耗体积¹⁾, 单位为标准立方米每小时(m^3/h);

ρ_r ——气体燃料的标况密度, 单位为千克每标准立方米(kg/m^3)。

$$\rho_r = \frac{CO_2 \times \rho_{CO_2} + CO \times \rho_{CO} + O_2 \times \rho_{O_2} + C_m H_n \times \rho_{C_m H_n} + H_2 \times \rho_{H_2} + N_2 \times \rho_{N_2} + H_2 O \times \rho_{H_2 O}}{100} \quad \dots\dots(3)$$

式中:

CO_2 、 CO 、 O_2 、 $C_m H_n$ 、 H_2 、 N_2 、 $H_2 O$ ——气体燃料中各成分的体积分数, 以百分数表示(%);

ρ_{CO_2} 、 ρ_{CO} 、 ρ_{O_2} 、 $\rho_{C_m H_n}$ 、 ρ_{H_2} 、 ρ_{N_2} 、 $\rho_{H_2 O}$ ——各成分的标况密度, 单位为千克每标准立方米(kg/m^3), 参见附录 B。

5.1.2.2 生料消耗量

生料消耗量计算公式见式(4):

$$m_s = \frac{M_s}{M_{sh}} \quad \dots\dots\dots(4)$$

式中:

m_s ——每千克熟料生料消耗量, 单位为千克每千克(kg/kg);

M_s ——每小时生料喂料量, 单位为千克每小时(kg/h)。

5.1.2.3 入窑回灰量

入窑回灰量计算公式见式(5):

$$m_{yh} = \frac{M_{yh}}{M_{sh}} \quad \dots\dots\dots(5)$$

式中:

m_{yh} ——每千克熟料入窑回灰量, 单位为千克每千克(kg/kg);

M_{yh} ——每小时入窑回灰量, 单位为千克每小时(kg/h)。

5.1.2.4 空气消耗量

5.1.2.4.1 进入系统一次空气量

进入系统一次空气量计算公式见式(6), 一次空气的标况密度计算公式见式(7)。

$$m_{1k} = \frac{V_{y1k} + V_{F1k}}{M_{sh}} \times \rho_{1k} \quad \dots\dots\dots(6)$$

式中:

m_{1k} ——每千克熟料进入系统一次空气量, 单位为千克每千克(kg/kg);

V_{y1k} ——每小时入窑一次空气体积, 单位为标准立方米每小时(m^3/h);

V_{F1k} ——每小时入分解炉一次空气体积, 单位为标准立方米每小时(m^3/h);

1) 本标准中不加说明时, 气体体积均指温度为 0℃, 压力为 101 325 Pa 时的体积, 单位为立方米(m^3), 简称“标准立方米”。

ρ_{1k} ——一次空气的标况密度,单位为千克每标准立方米(kg/m^3)。

$$\rho_{1k} = \frac{\text{CO}_2^{1k} \times \rho_{\text{CO}_2} + \text{CO}^{1k} \times \rho_{\text{CO}} + \text{O}_2^{1k} \times \rho_{\text{O}_2} + \text{N}_2^{1k} \times \rho_{\text{N}_2} + \text{H}_2\text{O}^{1k} \times \rho_{\text{H}_2\text{O}}}{100} \quad \dots\dots\dots(7)$$

式中:

CO_2^{1k} 、 CO^{1k} 、 O_2^{1k} 、 N_2^{1k} 、 H_2O^{1k} ——一次空气中各成分的体积分数,以百分数表示(%)。

5.1.2.4.2 进入冷却机空气量

进入冷却机空气量计算公式见式(8):

$$m_{Lk} = \frac{V_{Lk}}{M_{sh}} \times \rho_k \quad \dots\dots\dots(8)$$

式中:

m_{Lk} ——每千克熟料入冷却机的空气量,单位为千克每千克(kg/kg);

V_{Lk} ——每小时入冷却机的空气体积,单位为标准立方米每小时(m^3/h);

ρ_k ——空气的标况密度,单位为千克每标准立方米(kg/m^3)。

5.1.2.4.3 生料带入空气量

生料带入空气量计算公式见式(9):

$$m_{sk} = \frac{V_{sk}}{M_{sh}} \times \rho_k \quad \dots\dots\dots(9)$$

式中:

m_{sk} ——每千克熟料生料带入空气量,单位为千克每千克(kg/kg);

V_{sk} ——每小时生料带入空气体积,单位为标准立方米每小时(m^3/h)。

5.1.2.4.4 窑系统漏入空气量

窑系统漏入空气量计算公式见式(10):

$$m_{LOk} = \frac{V_{LOk}}{M_{sh}} \times \rho_k \quad \dots\dots\dots(10)$$

式中:

m_{LOk} ——每千克熟料系统漏入空气量,单位为千克每千克(kg/kg);

V_{LOk} ——每小时系统漏入空气体积,单位为标准立方米每小时(m^3/h)。

5.1.2.5 物料总收入

物料总收入计算公式见式(11):

$$m_{zs} = m_r + m_s + m_{yh} + m_{1k} + m_{Lk} + m_{sk} + m_{LOk} \quad \dots\dots\dots(11)$$

式中:

m_{zs} ——每千克熟料物料总收入,单位为千克每千克(kg/kg)。

5.1.3 支出物料

5.1.3.1 出冷却机熟料量

出冷却机熟料量计算公式见式(12):

$$m_{Lsh} = 1 - m_{Lsh} \quad \dots\dots\dots(12)$$

式中:

m_{Lsh} ——每千克熟料出冷却机熟料量,单位为千克每千克(kg/kg);

m_{Lfh} ——每千克熟料冷却机出口飞灰量,单位为千克每千克(kg/kg)。

5.1.3.2 预热器出口废气量

预热器出口废气量计算公式见式(13),预热器出口废气的标况密度计算公式见式(14):

$$m_f = \frac{V_f}{M_{sh}} \times \rho_f \quad \dots\dots\dots (13)$$

式中:

m_f ——每千克熟料预热器出口废气量,单位为千克每千克(kg/kg);

V_f ——每小时预热器出口废气体积,单位为标准立方米每小时(m^3/h);

ρ_f ——预热器出口废气的标况密度,单位为千克每标准立方米(kg/m^3)。

$$\rho_f = \frac{CO_2^f \times \rho_{CO_2} + CO^f \times \rho_{CO} + O_2^f \times \rho_{O_2} + N_2^f \times \rho_{N_2} + H_2O^f \times \rho_{H_2O}}{100} \quad \dots\dots\dots (14)$$

式中:

CO_2^f 、 CO^f 、 O_2^f 、 N_2^f 、 H_2O^f ——预热器出口废气中各成分的体积分数,以百分数表示(%)。

5.1.3.3 预热器出口飞灰量

预热器出口飞灰量计算公式见式(15):

$$m_{fh} = \frac{V_f \times K_{fh}}{M_{sh}} \quad \dots\dots\dots (15)$$

式中:

m_{fh} ——每千克熟料预热器出口飞灰量,单位为千克每千克(kg/kg);

K_{fh} ——预热器出口废气中飞灰的浓度,单位为千克每标准立方米(kg/m^3)。

5.1.3.4 冷却机排出空气量

冷却机排出空气量计算公式见式(16):

$$m_{pk} = \frac{V_{pk}}{M_{sh}} \times \rho_k \quad \dots\dots\dots (16)$$

式中:

m_{pk} ——每千克熟料冷却机排出空气量,单位为千克每千克(kg/kg);

V_{pk} ——每小时冷却机排出空气体积,单位为标准立方米每小时(m^3/h)。

5.1.3.5 煤磨抽冷却机空气量

煤磨抽冷却机空气量计算公式见式(17):

$$m_{Rk} = \frac{V_{Rk}}{M_{sh}} \times \rho_k \quad \dots\dots\dots (17)$$

式中:

m_{Rk} ——每千克熟料煤磨抽冷却机空气量,单位为千克每千克(kg/kg);

V_{Rk} ——每小时煤磨抽冷却机空气体积,单位为标准立方米每小时(m^3/h)。

5.1.3.6 冷却机出口飞灰量

冷却机出口飞灰量计算公式见式(18):

$$m_{Lfh} = \frac{V_{pk} \times K_{Lfh}}{M_{sh}} \quad \dots\dots\dots (18)$$

式中:

K_{Lfh} ——冷却机出口废气中飞灰的浓度,单位为千克每标准立方米(kg/m^3)。

5.1.3.7 其他支出

m_{qt} ,单位为千克每千克(kg/kg)。

5.1.3.8 物料总支出

物料总支出计算公式见式(19):

$$m_{ZC} = m_{Lsh} + m_i + m_{fh} + m_{pk} + m_{Rk} + m_{Lfh} + m_{qt} \dots\dots\dots (19)$$

式中:

m_{ZC} ——每千克熟料物料总支出,单位为千克每千克(kg/kg)。

5.1.4 物料平衡计算结果

物料平衡计算结果见表1。

表1 物料平衡计算结果

收 入 物 料				支 出 物 料			
项 目	符号	kg/kg	%	项 目	符号	kg/kg	%
燃料消耗量	m_r			出冷却机熟料量	m_{Lsh}		
生料消耗量	m_s			预热器出口废气量	m_i		
入窑回灰量	m_{yh}			预热器出口飞灰量	m_{fh}		
一次空气量	m_{1k}			冷却机排出空气量	m_{pk}		
入冷却机冷空气量	m_{Lk}			煤磨从系统抽出热空气量	m_{Rk}		
生料带入空气量	m_{sk}			冷却机出口飞灰量	m_{Lfh}		
系统漏入空气量	m_{LOk}			其他支出	m_{qt}		
合 计				合 计			

5.2 热平衡

5.2.1 热平衡范围

热平衡范围见图2。热平衡按 GB/T 2587 规定的方法进行计算。

5.2.2 收入热量

5.2.2.1 燃料燃烧热

燃料燃烧热计算公式见式(20):

$$Q_{rR} = m_r \times Q_{net,ar} \dots\dots\dots (20)$$

式中:

Q_{rR} ——每千克熟料燃料燃烧热,单位为千焦每千克(kJ/kg);

$Q_{net,ar}$ ——入窑和入分解炉燃料收到基低位发热量,单位为千焦每千克(kJ/kg)。采用煤作为燃料时, $Q_{net,ar}$ 为入窑煤粉收到基低位发热量,不能与原煤收到基发热量混淆。

$c_s = (0.88 + 2.93 \times 10^{-4} \times t_s) \times (1 - W^s) + 4.1816 \times W^s$, W^s 为生料的水分,以百分数表示(%);
 t_s ——生料的温度,单位为摄氏度(°C)。

5.2.2.5 入窑回灰显热

入窑回灰显热计算公式见式(24):

$$Q_{yh} = m_{yh} \times c_{yh} \times t_{yh} \quad \dots\dots\dots (24)$$

式中:

Q_{yh} ——每千克熟料入窑回灰显热,单位为千焦每千克(kJ/kg);

c_{yh} ——入窑回灰的比热,单位为千焦每千克摄氏度[kJ/(kg·°C)];

t_{yh} ——入窑回灰的温度,单位为摄氏度(°C)。

5.2.2.5.1 一次空气显热

一次空气显热计算公式见式(25):

$$Q_{lk} = \frac{V_{ylk}}{M_{sh}} \times c_k \times t_{ylk} + \frac{V_{Flk}}{M_{sh}} \times c_k \times t_{Flk} \quad \dots\dots\dots (25)$$

式中:

Q_{lk} ——每千克熟料一次空气显热,单位为千焦每千克(kJ/kg);

c_k ——空气的比热,单位为千焦每标准立方米摄氏度[kJ/(m³·°C)];

t_{ylk} ——入窑一次空气的温度,单位为摄氏度(°C);

t_{Flk} ——入分解炉一次空气的温度,单位为摄氏度(°C)。

入窑一次空气采用煤磨放风时其比热计算公式见式(26):

$$c_{k(\text{入窑})} = \frac{CO_2^{lk} \times c_{CO_2} + CO^{lk} \times c_{CO} + O_2^{lk} \times c_{O_2} + N_2^{lk} \times c_{N_2} + H_2O^{lk} \times c_{H_2O}}{100} \quad \dots\dots\dots (26)$$

式中:

$c_{k(\text{入窑})}$ ——入窑一次空气采用煤磨放风时的比热,单位为千焦每标准立方米摄氏度(kJ/(m³·°C));

c_{CO_2} 、 c_{CO} 、 c_{O_2} 、 c_{N_2} 、 c_{H_2O} ——在 0 °C ~ t_{lk} °C 内,各气体定压平均体积比热,单位为千焦每标准立方米摄氏度[kJ/(m³·°C)]。

5.2.2.5.2 入冷却机空气显热

入冷却机空气显热计算公式见式(27):

$$Q_{lk} = \frac{V_{Lk}}{M_{sh}} \times c_k \times t_{Lk} \quad \dots\dots\dots (27)$$

式中:

Q_{lk} ——每千克熟料入冷却机的空气显热,单位为千焦每千克(kJ/kg);

t_{Lk} ——入冷却机的空气温度,单位为摄氏度(°C)。

5.2.2.5.3 生料带入空气显热

生料带入空气显热计算公式见式(28):

$$Q_{sk} = \frac{V_{sk}}{M_{sh}} \times c_k \times t_s \quad \dots\dots\dots (28)$$

式中:

Q_{sk} ——每千克熟料生料带入空气显热,单位为千焦每千克(kJ/kg)。

5.2.2.5.4 系统漏入空气显热

系统漏入空气显热计算公式见式(29):

$$Q_{LOk} = \frac{V_{LOk}}{M_{sh}} \times c_k \times t_k \quad \dots\dots\dots (29)$$

式中:

Q_{LOk} ——每千克熟料系统漏入空气显热,单位为千焦每千克(kJ/kg);

t_k ——环境空气的温度,单位为摄氏度(°C)。

5.2.2.5.5 热量总收入

热量总收入计算公式见式(30):

$$Q_{zs} = Q_{rR} + Q_r + Q_{sR} + Q_s + Q_{yh} + Q_{lk} + Q_{Lk} + Q_{sk} + Q_{LOk} \quad \dots\dots\dots (30)$$

式中:

Q_{zs} ——每千克熟料热量总收入,单位为千焦每千克(kJ/kg)。

5.2.3 支出热量

5.2.3.1 熟料形成热

熟料形成热的理论计算方法按照附录C的规定进行计算,也可按以下简化公式计算:

a) 不考虑硫、碱的影响时用式(31)计算:

$$Q_{sh} = 17.19Al_2O_3^{sh} + 27.10MgO^{sh} + 32.01CaO^{sh} - 21.40SiO_2^{sh} - 2.47Fe_2O_3^{sh} \quad \dots\dots (31)$$

b) 考虑硫、碱的影响时用式(32)计算:

$$Q'_{sh} = Q_{sh} - 107.90(Na_2O^s - Na_2O^{sh}) - 71.09(K_2O^s - K_2O^{sh}) + 83.64(SO_3^s - SO_3^{sh}) \quad \dots\dots (32)$$

式中:

$Al_2O_3^{sh}$ 、 MgO^{sh} 、 CaO^{sh} 、 SiO_2^{sh} 、 $Fe_2O_3^{sh}$ 、 K_2O^{sh} 、 Na_2O^{sh} 、 SO_3^{sh} ——熟料中相应成分的质量分数,以百分数表示(%);

Na_2O^s 、 K_2O^s 、 SO_3^s ——生料中相应成分的灼烧基质量分数,以百分数表示(%)。

5.2.3.2 蒸发生料中水分耗热

蒸发生料中水分耗热计算公式见式(33):

$$Q_{ss} = m_s \times \frac{W^s}{100} \times q_{gh} \quad \dots\dots\dots (33)$$

式中:

Q_{ss} ——每千克熟料蒸发生料中的水分耗热,单位为千焦每千克(kJ/kg);

q_{gh} ——水的汽化热,单位为千焦每千克(kJ/kg)。

5.2.3.3 出冷却机熟料显热

出冷却机熟料显热计算公式见式(34):

$$Q_{Lsh} = (1 - m_{Lfh}) \times c_{sh} \times t_{Lsh} \quad \dots\dots\dots (34)$$

式中:

Q_{Lsh} ——出冷却机熟料显热,单位为千焦每千克(kJ/kg);

c_{sh} ——熟料的比热,单位为千焦每千克摄氏度[kJ/(kg·°C)];

t_{Lsh} ——出冷却机熟料温度,单位为摄氏度(°C)。

5.2.3.4 预热器出口废气显热

预热器出口废气显热计算公式见式(35),预热器出口废气比热计算公式见式(36):

$$Q_f = \frac{V_f}{M_{sh}} \times c_f \times t_f \quad \dots\dots\dots (35)$$

式中:

Q_f ——每千克熟料预热器出口废气显热,单位为千焦每千克(kJ/kg);

c_f ——预热器出口废气比热,单位为千焦每标准立方米摄氏度[kJ/(m³·℃)];

t_f ——预热器出口废气的温度,单位为摄氏度(℃)。

$$C_f = \frac{CO_2^f \times c_{CO_2} + CO^f \times c_{CO} + O_2^f \times c_{O_2} + N_2^f \times c_{N_2} + H_2O^f \times c_{H_2O}}{100} \quad \dots\dots\dots (36)$$

式中:

c_{CO_2} 、 c_{CO} 、 c_{O_2} 、 c_{N_2} 、 c_{H_2O} ——在 0℃~ t_f ℃内,各气体定压平均体积比热,单位为千焦每标准立方米摄氏度[kJ/(m³·℃)]。

5.2.3.5 预热器出口飞灰显热

预热器出口飞灰显热计算公式见式(37):

$$Q_{fh} = m_{fh} \times c_{fh} \times t_f \quad \dots\dots\dots (37)$$

式中:

Q_{fh} ——每千克熟料预热器出口飞灰显热,单位为千焦每千克(kJ/kg);

c_{fh} ——预热器出口飞灰的比热,单位为千焦每千克摄氏度[kJ/(kg·℃)]。

5.2.3.6 飞灰脱水及碳酸盐分解耗热

飞灰脱水及碳酸盐分解耗热计算公式见式(38),生料中 CO₂ 含量计算公式见式(39):

$$Q_{if} = m_{fh} \times \frac{100-L_{fh}}{100-L_s} \times \frac{H_2O^s}{100} \times 6\,690 + \left[m_{fh} \times \frac{100-L_{fh}}{100-L_s} \times \frac{CO_2^s}{100} - m_{fh} \times \frac{L_{fh}}{100} \right] \times \frac{100}{44} \times 1\,660 \quad \dots\dots (38)$$

式中:

Q_{if} ——每千克熟料飞灰脱水及碳酸盐分解耗热,单位为千焦每千克(kJ/kg);

L_{fh} ——飞灰的烧失量,以百分数表示(%);

L_s ——生料的烧失量,以百分数表示(%);

H_2O^s ——生料中化合水含量,以百分数表示(%);

6 690——高岭土脱水热,单位为千焦每千克(kJ/kg);

CO_2^s ——生料中 CO₂ 含量,以百分数表示(%);

1 660——CaCO₃ 分解热,单位为千焦每千克(kJ/kg)。

$$CO_2^s = \frac{CaO^s}{100} \times \frac{44}{56} + \frac{MgO^s}{100} \times \frac{44}{40.3} \quad \dots\dots\dots (39)$$

式中:

CaO^s、MgO^s——分别为生料中 CaO 和 MgO 含量,以百分数表示(%)。

5.2.3.7 冷却机排出空气显热

冷却机排出空气显热计算公式见式(40):

$$Q_{pk} = \frac{V_{pk}}{M_{sh}} \times c_k \times t_{pk} \quad \dots\dots\dots (40)$$

式中:

Q_{pk} ——每千克熟料冷却机排出空气显热,单位为千焦每千克(kJ/kg);

t_{pk} ——冷却机排出空气温度,单位为摄氏度(°C)。

注:当冷却机有多个废气出口时,应分别计算各废气出口排出空气显热。

5.2.3.8 冷却机出口飞灰显热

冷却机出口飞灰显热计算公式见式(41):

$$Q_{Lfh} = m_{Lfh} \times c_{Lfh} \times t_{pk} \quad \dots\dots\dots (41)$$

式中:

Q_{Lfh} ——每千克熟料冷却机出口飞灰显热,单位为千焦每千克(kJ/kg);

c_{Lfh} ——冷却机出口飞灰的比热,单位为千焦每千克摄氏度[kJ/(kg·°C)]。

5.2.3.9 煤磨抽冷却机空气显热

煤磨抽冷却机空气显热计算公式见式(42):

$$Q_{Rk} = \frac{V_{Rk}}{M_{sh}} \times c_k \times t_{Rk} \quad \dots\dots\dots (42)$$

式中:

Q_{Rk} ——每千克熟料煤磨抽冷却机空气显热,单位为千焦每千克(kJ/kg);

t_{Rk} ——煤磨抽冷却机空气温度,单位为摄氏度(°C)。

5.2.3.10 化学不完全燃烧的热损失

化学不完全燃烧的热损失计算公式见式(43):

$$Q_{hb} = \frac{V_f}{M_{sh}} \times \frac{CO^f}{100} \times 12\,630 \quad \dots\dots\dots (43)$$

式中:

Q_{hb} ——每千克熟料化学不完全燃烧热损失,单位为千焦每千克(kJ/kg);

CO^f ——预热器出口废气中CO的体积分数,以百分数表示(%);

12 630——CO的热值,单位为千焦每标准立方米(kJ/m³)。

5.2.3.11 机械不完全燃烧的热损失

机械不完全燃烧的热损失计算公式见式(44):

$$Q_{jb} = \frac{L_{sh}}{100} \times 33\,874 \quad \dots\dots\dots (44)$$

式中:

Q_{jb} ——每千克熟料机械不完全燃烧热损失,单位为千焦每千克(kJ/kg);

L_{sh} ——熟料的烧失量,以百分数表示(%);

33 874——碳的热值,单位为千焦每千克(kJ/kg)。

5.2.3.12 系统表面散热

系统表面散热计算公式见式(45):

$$Q_B = \frac{\sum Q_{Bi}}{M_{sh}} \quad \dots\dots\dots (45)$$

式中:

Q_B ——每千克熟料系统表面散热量,单位为千焦每千克(kJ/kg);

$\sum Q_{\text{Ri}}$ ——每小时系统表面总散热量,单位为千焦每小时(kJ/h)。

5.2.3.13 冷却水带出热

冷却水带出热计算公式见式(46):

$$Q_{\text{Ls}} = \frac{M_{\text{Ls}} \times (t_{\text{cs}} - t_{\text{js}}) \times c'_s + M_{\text{qh}} \times q_{\text{qh}}}{M_{\text{sh}}} \dots\dots\dots (46)$$

式中:

Q_{Ls} ——每千克熟料冷却水带出热量,单位为千焦每千克(kJ/kg);

M_{Ls} ——每小时冷却水用量,单位为千克每小时(kg/h);

t_{cs} ——冷却水出水温度,单位为摄氏度(°C);

t_{js} ——冷却水进水温度,单位为摄氏度(°C);

c'_s ——水的比热,4.181 6,单位为千焦每千克摄氏度[kJ/(kg·°C)];

M_{qh} ——每小时汽化冷却水量,单位为千克每小时(kg/h);

q_{qh} ——水的汽化热,单位为千焦每千克(kJ/kg)。

5.2.3.14 其他支出

Q_{qt} ,单位为千焦每千克(kJ/kg)。

5.2.3.15 热量总支出

热量总支出计算公式见式(47):

$$Q_{\text{ZC}} = Q_{\text{sh}} + Q_{\text{ss}} + Q_{\text{Lsh}} + Q_{\text{f}} + Q_{\text{fh}} + Q_{\text{tf}} + Q_{\text{pk}} + Q_{\text{Lfh}} + Q_{\text{Rk}} + Q_{\text{hb}} + Q_{\text{jb}} + Q_{\text{B}} + Q_{\text{Ls}} + Q_{\text{qt}} \dots\dots\dots (47)$$

式中:

Q_{ZC} ——每千克熟料热量总支出,单位为千焦每千克(kJ/kg)。

5.2.3.16 热平衡计算结果

热平衡计算结果见表2。

表2 热平衡计算结果

收入热量				支出热量			
项 目	符号	kJ/kg	%	项 目	符号	kJ/kg	%
燃料燃烧热	Q_{LR}			熟料形成热	Q_{sh}		
燃料显热	Q_{f}			蒸发生料中水分耗热	Q_{ss}		
生料中可燃物质燃烧热	Q_{aR}			出冷却机熟料显热	Q_{Lsh}		
生料显热	Q_{s}			预热器出口废气显热	Q_{f}		
入窑回灰显热	Q_{yh}			预热器出口飞灰显热	Q_{fh}		
一次空气显热	Q_{lk}			飞灰脱水及碳酸盐分解耗热	Q_{tf}		
入冷却机冷空气显热	Q_{Lk}			冷却机排出空气显热	Q_{pk}		
生料带人空气显热	Q_{sk}			冷却机出口飞灰显热	Q_{Lfh}		
系统漏入空气显热	Q_{Lok}			煤磨抽冷却机热空气显热	Q_{Rk}		
				化学不完全燃烧热损失	Q_{hb}		

表 2 (续)

收 入 热 量				支 出 热 量			
项 目	符号	kJ/kg	%	项 目	符号	kJ/kg	%
				机械不完全燃烧热损失	Q_{qb}		
				系统表面散热	Q_b		
				冷却水带出热	Q_{Ls}		
				其他支出	Q_{qt}		
合计				合计			

5.2.4 回转窑系统的热效率计算

回转窑系统的热效率计算公式见式(48)：

$$\eta_v = \frac{Q_{sh}}{Q_{rR} + Q_{sR}} \dots\dots\dots (48)$$

式中：

η_v ——回转窑系统的热效率，以百分数表示(%)。

6 冷却机的热平衡与热效率计算

6.1 热平衡

6.1.1 收入热量

6.1.1.1 出窑熟料显热

出窑熟料显热计算公式见式(49)：

$$Q_{ysh} = 1 \times c_{sh} \times t_{ysh} \dots\dots\dots (49)$$

式中：

Q_{ysh} ——出窑熟料显热，单位为千焦每千克(kJ/kg)；

t_{ysh} ——出窑熟料温度，单位为摄氏度(℃)。

6.1.1.2 入冷却机空气显热

入冷却机空气显热计算公式见式(50)：

$$Q'_{Lk} = \frac{V_{Lk}}{M_{sh}} \times c_k \times t_{Lk} + \frac{V_{LOk(冷却机)}}{M_{sh}} \times c_k \times t_k \dots\dots\dots (50)$$

式中：

Q'_{Lk} ——每千克熟料入冷却机总空气显热，单位为千焦每千克(kJ/kg)；

$V_{LOk(冷却机)}$ ——每小时冷却机漏入空气体积，单位为标准立方米每小时(m³/h)。

6.1.1.3 热量总收入

热量总收入计算公式见式(51)：

$$Q_{LZS} = Q_{ysh} + Q'_{Lk} \dots\dots\dots (51)$$

式中:

Q_{L2S} ——冷却机热量总收入,单位为千焦每千克(kJ/kg)。

6.1.2 支出热量

6.1.2.1 出冷却机熟料显热

按式(34)计算。

6.1.2.2 入窑二次空气显热

入窑二次空气显热计算公式见式(52),每小时入窑二次空气体积计算公式见式(53):

$$Q_{y2k} = \frac{V_{y2k}}{M_{sh}} \times c_k \times t_{y2k} \quad \dots\dots\dots (52)$$

式中:

Q_{y2k} ——每千克熟料入窑二次空气显热,单位为千焦每千克(kJ/kg);

V_{y2k} ——每小时入窑二次空气体积,单位为标准立方米每小时(m^3/h);

t_{y2k} ——入窑二次空气的温度,单位为摄氏度($^{\circ}C$)。

$$V_{y2k} = V'_k \times \alpha_y \times M_{yr} \times (1 - \phi_{yT}) - V_{y1k} \quad \dots\dots\dots (53)$$

式中:

α_y ——窑尾过剩空气系数;

ϕ_{yT} ——窑头漏风系数,视窑头密闭情况而定,一般选 $\phi_{yT} = 2\% \sim 10\%$;

V'_k ——燃料完全燃烧时理论空气需要量,对固体及液体燃料,单位为标准立方米每千克(m^3/kg),
对气体燃料,单位为标准立方米每标准立方米(m^3/m^3)。

6.1.2.2.1 根据燃料元素分析(或成分分析)结果计算 V'_k

a) 固体及液体燃料

固体及液体燃料完全燃烧时理论空气需要量计算公式见式(54):

$$V'_k = 0.089C_{ar} + 0.267H_{ar} + 0.033(S_{ar} - O_{ar}) \quad \dots\dots\dots (54)$$

式中:

C_{ar} 、 H_{ar} 、 S_{ar} 、 O_{ar} ——燃料中各元素质量百分含量,以百分数表示(%)。

b) 气体燃料

气体燃料完全燃烧时理论空气需要量计算公式见式(55):

$$V'_k = 0.0476 \times (0.5CO + 0.5H_2 + 2CH_4 + 3C_2H_4 + 1.5H_2S - O_2) \quad \dots\dots\dots (55)$$

式中:

CO 、 H_2 、 CH_4 、 C_2H_4 、 H_2S 、 O_2 ——气体燃料中各成分体积分数,以百分数表示(%)。

6.1.2.2.2 根据燃料收到基低位发热量近似计算 V'_k

a) 固体燃料

固体燃料完全燃烧时理论空气需要量计算公式见式(56):

$$V'_k = \frac{0.241Q_{net,ar}}{1000} + 0.5 \quad \dots\dots\dots (56)$$

b) 液体燃料

液体燃料完全燃烧时理论空气需要量计算公式见式(57):

$$V'_k = \frac{0.203Q_{\text{net,ar}}}{1\,000} + 2.0 \quad \dots\dots\dots (57)$$

c) 气体燃料

对于 $Q_{\text{net,ar}} < 12\,560 \text{ kJ/m}^3$ 的煤气完全燃烧时理论空气需要量计算公式见式(58):

$$V'_k = \frac{0.209Q_{\text{net,ar}}}{1\,000} \quad \dots\dots\dots (58)$$

对于 $Q_{\text{net,ar}} > 12\,560 \text{ kJ/m}^3$ 的煤气完全燃烧时理论空气需要量计算公式见式(59):

$$V'_k = \frac{0.26Q_{\text{net,ar}}}{1\,000} - 0.25 \quad \dots\dots\dots (59)$$

对于天然气完全燃烧时理论空气需要量计算公式见式(60):

$$V'_k = \frac{0.264Q_{\text{net,ar}}}{1\,000} + 0.02 \quad \dots\dots\dots (60)$$

6.1.2.2.3 入分解炉三次空气显热

入分解炉三次空气显热计算公式见式(61):

$$Q_{\text{F3k}} = \frac{V_{\text{F3k}}}{M_{\text{sh}}} \times c_k \times t_{\text{F3k}} \quad \dots\dots\dots (61)$$

式中:

Q_{F3k} ——每千克熟料入分解炉三次空气显热,单位为千焦每千克(kJ/kg);

t_{F3k} ——入分解炉三次空气的温度,单位为摄氏度(°C)。

6.1.2.2.4 煤磨抽冷却机空气显热

按式(42)计算。

6.1.2.2.5 冷却机排出空气显热

按式(40)计算。

6.1.2.2.6 冷却机出口飞灰显热

按式(41)计算。

6.1.2.2.7 冷却机表面散热

冷却机表面散热计算公式见式(62):

$$Q_{\text{LB}} = \frac{\sum Q_{\text{Lbi}}}{M_{\text{sh}}} \quad \dots\dots\dots (62)$$

式中:

Q_{LB} ——每千克熟料冷却机表面散热量,单位为千焦每千克(kJ/kg);

$\sum Q_{\text{Lbi}}$ ——每小时冷却机表面总散热量,单位为千焦每小时(kJ/h)。

6.1.2.2.8 冷却水带走热

冷却水带走热计算公式见式(63):

$$Q_{\text{LLs}} = \frac{M_{\text{LLs}} \times (t_{\text{Lcs}} - t_{\text{Ljs}}) \times c'_s + M_{\text{Lqh}} \times q_{\text{qh}}}{M_{\text{sh}}} \quad \dots\dots\dots (63)$$

式中:

Q_{LLs} ——每千克熟料冷却机冷却水带走热,单位为千焦每千克(kJ/kg);

- M_{LLs} ——每小时冷却机冷却水用量,单位为千克每小时(kg/h);
 t_{Lcs}, t_{Ljs} ——分别为冷却机冷却水出水和进水温度,单位为摄氏度(℃);
 M_{Lqh} ——每小时冷却机汽化冷却水量,单位为千克每小时(kg/h)。

6.1.2.2.9 冷却机其他支出

Q_{Lqt} ,冷却机其他支出,单位为千焦每千克(kJ/kg)。

6.1.2.2.10 热量总支出

热量总支出计算公式见式(64):

$$Q_{LZC} = Q_{Lsh} + Q_{y2k} + Q_{F3k} + Q_{Rk} + Q_{pk} + Q_{Lfh} + Q_{LB} + Q_{LLs} + Q_{Lqt} \quad \text{..... (64)}$$

式中:

Q_{LZC} ——冷却机热量总支出,单位为千焦每千克(kJ/kg)。

6.1.2.3 冷却机热平衡计算结果

冷却机热平衡计算结果见表3。

表3 冷却机热平衡计算结果

收 入 热 量				支 出 热 量			
项 目	符号	kJ/kg	%	项 目	符号	kJ/kg	%
入冷却机熟料显热	Q_{ysh}			出冷却机熟料显热	Q_{Lsh}		
入冷却机冷空气显热	$Q'_{t,k}$			入窑二次空气显热	Q_{y2k}		
				入炉三次空气显热	Q_{F3k}		
				煤磨抽热风显热	Q_{Rk}		
				冷却机排风显热	Q_{pk}		
				冷却机出口飞灰显热	Q_{Lfh}		
				冷却机表面散热	Q_{LB}		
				冷却水带走热	Q_{LLs}		
				其他支出	Q_{Lqt}		
合计				合计			

6.1.3 冷却机的热效率计算

冷却机的热效率计算公式见式(65):

$$\eta_L = \frac{Q_{y2k} + Q_{F3k}}{Q_{ysh}} \quad \text{..... (65)}$$

式中:

η_L ——冷却机的热效率,以百分数表示(%)。

6.2 熟料烧成综合能耗计算

6.2.1 熟料烧成综合能耗计算的范围

6.2.1.1 熟料烧成实际消耗的各种能源,包括一次能源(原油、原煤、天然气等)、二次能源(电力、热力、

焦炭等国家统计制度所规定的各种能源统计品种)及耗能工质(水、压缩空气等)所消耗的能源。各种能源不得重记和漏计。

6.2.1.2 熟料烧成实际消耗的各种能源,系指用于生产目的所消耗的各种能源。包括主要生产系统、辅助生产系统和附属生产系统用能,主要生产系统指生料输送、生料预热(和分解)和熟料烧成与冷却系统等,辅助生产系统指排风及收尘系统等,附属生产系统指控制检测系统等。不包括用于生活目的和基建项目用能。

6.2.1.3 在实际消耗的各种能源中,作为原料用途的能源应包括在内;带余热发电的回转窑,若余热锅炉在热平衡范围内,余热发电消耗和回收的能源应包括在内,若余热锅炉在热平衡范围外,余热发电消耗和回收的能源应不包括在内。

6.2.1.4 各种能源统计范围如下:从生料出库(或料浆池)到熟料入库;从燃料出煤粉仓(或工作油罐)到废气出大烟囱。具体包括:生料输送,生料预热(和分解),熟料烧成与冷却,熟料输送,排风及收尘,控制检测等项,而不包括生料和燃料制备。

6.2.2 各种能源综合计算原则

6.2.2.1 各种能源消耗量,均指实际测得的消耗量。

6.2.2.2 各种能源均应折算成标准煤耗。

1 kg 标准煤的热值见 GB/T 2589。

6.2.2.3 熟料烧成消耗的一次能源及生料中可燃物质,均折算为标准煤量。

6.2.2.4 熟料烧成消耗的二次能源及耗能工质消耗的能源均应折算成一次能源,其中耗能工质按 GB/T 2589 的规定折算成一次能源。电力能源按国家统计局规定折算成标准煤量。

6.2.3 熟料单位产量综合能耗计算

熟料单位产量综合能耗按式(66)计算:

$$E_{cl} = \frac{e_{cl}}{P} \quad \dots\dots\dots (66)$$

式中:

E_{cl} ——熟料单位产量综合能耗,单位为 kgce/t;

e_{cl} ——熟料烧成综合能耗,单位为 kgce;

P ——标定期间熟料产量,单位为 t。

附 录 A
(资料性附录)

窑的主要设备情况及热平衡参数测定结果记录表

A.1 窑的主要设备情况及热平衡参数测定结果

窑的主要设备情况及热平衡参数测定结果记录见表 A.1~表 A.9。

表 A.1 主要设备情况

工厂名称				
工厂厂址				
窑的编号				
烧成方法				
名 称		单位	规格参数	备注
回 转 窑	规格	m		
	胴体内容积	m ³		
	平均有效直径	m		
	有效长度	m		
	有效内表面积	m ²		
	有效内容积	m ³		
	斜度	‰		
	窑速	r/min		
	电机型号			
	电机功率	kW		
分解 炉	型式			
	规格	m		
预 热 器	型式			
	规 格	C1	m	
		C2	m	
		C3	m	
		C4	m	
		C5	m	
余 热 发 电	锅炉	型号		
		规格	m	
	发电 机组	型号		
		规格	m	
		能力	kW	

表 A.1 (续)

名 称		单位	规格参数	备注
燃 烧 喷 嘴	窑头	型式		
		规格	mm	
	分解炉	型式		
		规格	mm	
一 次 风 机	窑头	型号		
		风压	Pa	
		铭牌风量	m ³ /min	
		电机功率	kW	
	窑尾	型号		
		风压	Pa	
		铭牌风量	m ³ /min	
		电机功率	kW	
喂 煤 设 备	窑头 罗茨 风机	型号		
		能力	t/h	
		型号		
		铭牌风量	m ³ /min	
		风压	kPa	
		电机功率	kW	
	分解 炉 罗茨 风机	型号		
		能力	t/h	
		铭牌风量	m ³ /min	
		风压	kPa	
喂料 设备	斗式 提升 机	型号		
		能力	t/h	
		输送高度	m	
增湿塔		规格	mm	
		工况处理风量	m ³ /h	
收 尘 设 备	窑尾	型式		
		工况处理风量	m ³ /h	
	冷却 机	型式		
		工况处理风量	m ³ /h	
冷 却 机 系 统	冷却机	型式		
		型号		
		篦床面积		
	一室 风机 A	型号		
		风压		
		铭牌风量		
		电机功率		

表 A.1 (续)

名 称		单位	规格参数	备注
冷 却 机 系 统	一 室 风 机 B	型号		
		风压	Pa	
		铭牌风量	m ³ /h	
		电机功率	kW	
	平 衡 风 机	型号		
		风压	Pa	
		铭牌风量	m ³ /h	
		电机功率	kW	
	二 室 风 机	型号		
		风压	Pa	
		铭牌风量	m ³ /h	
		电机功率	kW	
	三 室 风 机	型号		
		风压	Pa	
		铭牌风量	m ³ /h	
		电机功率	kW	
	四 室 风 机	型号		
		风压	Pa	
		铭牌风量	m ³ /h	
		电机功率	kW	
	五 室 风 机	型号		
		风压	Pa	
		铭牌风量	m ³ /h	
		电机功率	kW	
	六 室 风 机	型号		
		风压	Pa	
		铭牌风量	m ³ /h	
		电机功率	kW	
冷 却 机 余 风 风 机	型号			
	风压	Pa		
	铭牌风量	m ³ /h		
	介质温度	℃		
	电机功率	kW		

表 A.1 (续)

名 称		单 位	规格参数	备 注
窑尾 高温 风机	型号			
	风压	Pa		
	铭牌风量	m ³ /h		
	介质温度	℃		
	电机功率	kW		
窑尾 排 风机	型号			
	风压	Pa		
	铭牌风量	m ³ /h		
	介质温度	℃		
	电机功率	kW		

表 A.2 热平衡参数测定记录

测定时间	年 月 日					
测定人员						
天气情况	大气压力/Pa			气温/℃	风速(m/s)	空气湿度/%
测 定 项 目			单 位	测定数据	备 注	
熟料	产量		kg/h			t/d
	温度	窑出口	℃			
		冷却机出口	℃			
入窑生料	喂料量		kg/h		折 合 比	
	水分		%			
	温度		℃			
	可燃物质的含量		kg/kg			
窑灰	增湿塔回收窑灰量		kg/h			
	收尘器回收窑灰量		kg/h			
	入窑回灰	灰量	kg/h			
		温度	℃			
		水分	%			
入窑燃料	喂料量	窑头	kg/h			
		分解炉	kg/h			
		合计	kg/h			
	温度	窑用	℃			
		炉用	℃			
	煤灰掺入率		%			
	种类					
	产地					

表 A.3 气体体积与含尘量测定结果

测定项目			风量		温度	压力	含尘 浓度	飞灰量	飞灰 水分	飞灰 烧失量	备注
			工况/ (m³/h)	标况/ (m³/h)	℃	Pa	kg/m³	kg/h	%	%	
一次 空气	入窑	送煤风									
		净风									
	入分解炉	送煤风									
		净风									
生料带入空气											
入 冷 却 机 的 冷 空 气	平衡风机										
	一室风机 A1										
	一室风机 A2										
	一室风机 B1										
	一室风机 B2										
	二室风机										
	三室风机										
	四室风机										
	五室风机										
	六室风机										
总空气量											
预热器出口废气											
入窑二次空气											
冷却机排风											
煤磨抽冷却机热风											
入分解炉三次空气											

表 A.4 化学分析结果

项目	烧失量/ %	SiO ₂ / %	Al ₂ O ₃ / %	Fe ₂ O ₃ / %	CaO/ %	MgO/ %	K ₂ O/ %	Na ₂ O/ %	SO ₃ / %	Cl ⁻ / %	总和/ %	f-CaO/ %	KH	SM	IM
熟料															
生料															
煤灰															
飞灰															

表 A.5 固体燃料和液体燃料分析结果

燃料种类	水分/ %	元素分析					工业分析					低位热值 $Q_{\text{net}, \text{ad}} /$ (kJ/kg)	低位热值 $Q_{\text{net}, \text{ar}} /$ (kJ/kg)
		$C_{\text{ar}} /$ %	$H_{\text{ar}} /$ %	$S_{\text{ar}} /$ %	$N_{\text{ar}} /$ %	$O_{\text{ar}} /$ %	$M_{\text{ad}} /$ %	$V_{\text{ad}} /$ %	$A_{\text{ad}} /$ %	$FC_{\text{ad}} /$ %	焦渣特性 #		
固体燃料													
可燃物质													
液体燃料													

表 A.6 气体燃料分析结果

气体燃料	$W /$ %	$H_2 /$ %	$CO /$ %	$CO_2 /$ %	$N_2 /$ %	$O_2 /$ %	$C_m H_n /$ %	$SO_2 /$ %	$H_2 S /$ %	低位热值 $Q_{\text{net}, \text{ar}} /$ (kJ/kg)

表 A.7 气体成分与含湿量测定结果

测 点	气体成分/%				过剩空气系数 α	含湿量/%
	CO_2	O_2	CO	N_2		
窑尾烟室						
分解炉出口						
预热器出口						
C5 出口						
烟囱						
一次空气						

表 A.8 表面散热测定结果

测定项目	每小时散热量/(kJ/h)	每千克熟料散热量/(kJ/kg)
回转窑		
预热器		
分解炉		
三次风管		
冷却机		
合计		

表 A.9 冷却水测定结果

测定项目	冷却水量/(kg/h)	进水温度/ ℃	出水温度/ ℃	汽化耗水量/ (kg/h)	耗热量/ (kJ/h)
回转窑					
冷却机					
合计					

附 录 B
(资料性附录)
各类数据表

B.1 各类数据

各种气体的常数见表 B.1,各种气体的平均比热见表 B.2,水在不同温度下的汽化热见表 B.3,燃料的平均比热见表 B.4,物料成分的平均比热见表 B.5,熟料矿物成分的平均比热见表 B.6,熟料与窑灰的平均比热见表 B.7。

表 B.1 各种气体的常数

名称	分子式	分子量	密度/(kg/m ³)		气 体 热 值			
					kJ/m ³		kJ/kg	
			计算值	实测值	Q _{gr}	Q _{net}	Q _{gr}	Q _{net}
空气		29	1.292 2	1.292 8				
氧	O ₂	32	1.427 6	1.428 95				
氢	H ₂	2	0.089 94	0.089 94	12 755.1	10 789.6	141 719.6	119 897.9
氮	N ₂	28	1.249 9	1.250 5				
一氧化碳	CO	28	1.249 5	1.250 0	12 629.6	12 629.6	10 099.5	10 099.5
二氧化碳	CO ₂	44	1.963 4	1.976 8				
二氧化硫	SO ₂	64	2.858 1	2.926 5				
三氧化硫	SO ₃	80	—	(3.575)				
硫化氢	H ₂ S	34	—	1.539 2	25 108.7	23 143.2	16 075.6	15 205.8
一氧化氮	NO	30	1.338 8	1.340 2				
氧化二氮	N ₂ O	44	1.963 7	1.987 8				
水蒸气	H ₂ O	18	—	0.804				
甲烷	CH ₄	16	0.715 2	0.716 3	39 729.0	35 802.1	55 474.2	49 991.6
乙烷	C ₂ H ₆	30	1.340 6	1.356 0	69 605.2	63 712.8	51 852.6	47 465.7
丙烷	C ₃ H ₈	44	—	2.003 7	99 063.2	91 205.2	50 326.2	46 332.4
丁烷	C ₄ H ₁₀	58	—	2.703	128 441.8	118 250.2	49 385.2	45 600.5
戊烷	C ₅ H ₁₂	72	—	3.457	157 786.9	146 006.2	48 992.1	45 332.9
乙炔	C ₂ H ₂	26	1.160 7	1.170 9	57 991.8	56 026.3	49 891.3	48 201.7
乙烯	C ₂ H ₄	28	1.250 6	1.260 4	62 960.0	59 033.1	50 276.0	47 139.5
丙烯	C ₃ H ₆	42	—	1.915	91 853.4	85 961.0	48 895.9	45 759.4
丁烯	C ₄ H ₈	56	—	2.50	121 307.3	113 453.5	48 431.7	45 295.2
戊烯	C ₅ H ₁₀	70			150 635.6	140 816.3	48 113.9	44 977.4
苯	C ₆ H ₆	78		3.3	147 311.0	141 426.9	42 246.6	40 557.0
碳	C	12	2.26(固)				33 874.2	33 874
硫	S	32	1.96(单斜) 2.07(斜方)				10 455.0	10 455.0

表 B.2 各种气体的平均比热

单位为千焦每立方米摄氏度

温度/℃	CO ₂	H ₂ O	空气	CO	空气中 N ₂	O ₂	H ₂	SO ₂	H ₂ S	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈
0	1.606	1.489	1.296	1.296	1.296	1.305	1.280	1.736	1.464	1.539	1.869	1.869	2.196	3.065
100	1.736	1.497	1.301	1.301	1.301	1.313	1.292	1.819	1.510	1.614	2.045	2.104	2.501	3.530
200	1.802	1.514	1.309	1.305	1.305	1.334	1.296	1.894	1.552	1.752	2.183	2.325	2.794	3.973
300	1.878	1.535	1.317	1.317	1.313	1.355	1.301	1.961	1.598	1.886	2.288	2.530	3.074	4.395
400	1.940	1.556	1.330	1.330	1.322	1.376	1.301	2.024	1.644	2.007	2.367	2.718	3.333	4.793
500	2.007	1.581	1.342	1.342	1.334	1.397	1.305	2.074	1.681	2.129	2.438	2.890	3.576	5.144
600	2.058	1.606	1.355	1.355	1.347	1.414	1.309	2.116	1.719	2.246	2.505	3.049	3.801	5.449
700	2.104	1.631	1.372	1.372	1.355	1.434	1.313	2.154	1.756	2.354	2.572	3.187	4.011	5.763
800	2.145	1.660	1.384	1.388	1.368	1.451	1.317	2.187	1.794	2.459	2.626	3.341	4.203	6.047
900	2.183	1.685	1.397	1.401	1.384	1.464	1.322	2.216	1.828	2.551	2.681	3.446	4.374	6.298
1 000	2.216	1.715	1.409	1.414	1.397	1.476	1.330	2.242	1.861	2.643	2.731	3.559	4.537	6.516
1 100	2.233	1.748	1.422	1.426	1.405	1.489	1.334	2.258						
1 200	2.258	1.777	1.434	1.439	1.418	1.501	1.338	2.279						
1 300	2.292	1.802	1.443	1.451	1.430	1.510	1.347							
1 400	2.313	1.823	1.455	1.460	1.439	1.518	1.355							
1 500	2.334	1.848	1.464	1.468	1.447	1.531	1.363							

表 B.3 水在不同温度下的汽化热

单位为千焦每千克

温度/℃	汽化热	温度/℃	汽化热	温度/℃	汽化热	温度/℃	汽化热
0	2 497.5	40	2 403.4	80	2 305.5	120	2 198.5
5	2 485.8	45	2 391.3	85	2 292.6	125	2 184.7
10	2 474.1	50	2 380.0	90	2 279.6	130	2 170.0
15	2 462.4	55	2 367.4	95	2 266.6	135	2 155.0
20	2 450.7	60	2 355.7	100	2 253.7	140	2 140.8
25	2 438.9	65	2 343.2	105	2 239.9	145	2 125.3
30	2 427.2	70	2 331.0	110	2 226.5	150	2 110.2
35	2 415.1	75	2 318.5	115	2 212.7	200	1 957.2

表 B.4 燃料的平均比热

单位为千焦每千克摄氏度

温度/ ℃	煤的比热						燃油的比热		
	煤的挥发分/ %						油的容重/(kg/L)		
	10	15	20	25	30	35	0.8	0.9	1.0
0	0.953	0.987	1.025	1.058	1.096	1.129	1.882	1.756	1.673
10	0.966	0.999	1.037	1.075	1.112	1.146	1.899	1.773	1.690
20	0.979	1.016	1.054	1.092	1.125	1.163	1.915	1.790	1.706
30	0.991	1.033	1.071	1.108	1.142	1.179	1.932	1.807	1.723
40	1.008	1.046	1.083	1.121	1.158	1.196	1.949	1.823	1.740
50	1.025	1.062	1.100	1.138	1.175	1.213	1.966	1.840	1.756
60	1.037	1.079	1.112	1.154	1.192	1.230	1.982	1.857	1.773
70	1.050	1.087	1.129	1.167	1.209	1.246	1.999	1.874	1.790
80	1.066	1.104	1.146	1.184	1.225	1.267	2.016	1.890	1.807
90	1.079	1.121	1.158	1.200	1.242	1.284	2.032	1.907	1.823
100	1.092	1.133	1.175	1.217	1.259	1.301	2.049	1.924	1.840
110	1.108	1.150	1.192	1.234	1.276	1.317	2.066	1.940	1.857
120	1.121	1.163	1.209	1.250	1.288	1.334	2.083	1.957	1.874
130	1.138	1.179	1.225	1.267	1.305	1.351	2.099	1.974	1.890
140	1.154	1.196	1.242	1.284	1.322	1.368	2.116	1.991	1.907
150	1.167	1.209	1.255	1.296	1.338	1.384	2.133	2.007	1.924
160	1.184	1.225	1.271	1.313	1.355	1.401			
170	1.196	1.242	1.284	1.330	1.372	1.418			

表 B.5 物料成分的平均比热

单位为千焦每千克摄氏度

温度/℃	SiO ₂	CaO	CaCO ₃	MgO	MgCO ₃	高岭土	脱高岭	矿渣
100	0.799	0.786	0.874	0.979	1.075	0.991	0.841	
200	0.824	0.820	0.928	1.004	1.154	1.066	0.899	
300	0.920	0.841	0.979	1.029	1.217	1.121	0.941	0.903
400	0.970	0.853	1.020	1.054	1.267	1.158	0.979	0.933
500	1.025	0.861	1.050	1.079	1.313	1.184	1.008	0.945
600	1.066	0.870	1.079	1.100	1.347		1.029	0.962
700	1.083	0.878	1.096	1.121	1.368		1.046	0.991

表 B.5 (续)

单位为千焦每千克摄氏度

温度/℃	SiO ₂	CaO	CaCO ₃	MgO	MgCO ₃	高岭土	脱高岭	矿渣
800	1.092	0.887	1.104	1.142	1.380		1.062	1.008
900	1.100	0.891	1.112	1.158			1.079	1.016
1 000	1.108	0.895		1.171			1.092	1.029
1 100	1.112	0.899					1.108	1.046
1 200	1.117	0.903					1.117	1.075
1 300	1.129	0.907					1.121	1.158
1 400	1.133	0.912					1.129	
1 500	1.138	0.916						

表 B.6 熟料矿物成分的平均比热

单位为千焦每千克摄氏度

温度/℃	C ₃ S	β-C ₂ S	γ-C ₂ S	C ₃ A
100			0.790	
200				
300	0.866		0.866	0.887
400	0.891		0.891	
450	0.903		0.903	
500	0.912	0.933	0.916	0.924
600	0.933	0.949	0.933	
675	0.945	0.966	0.949	
700	0.949	0.974		0.945
800	0.966	0.995		
900	0.979	1.012		0.958
1 000	0.995	1.025		
1 100	1.008	1.041		0.970
1 200	1.012	1.054		
1 300	1.020	1.062		0.983
1 400	1.029			
1 500	1.037			

表 B.7 熟料与窑灰的平均比热

单位为千焦每千克摄氏度

温度/℃	比 热		温度/℃	比 热	
	熟 料	窑 灰		熟 料	窑 灰
0	0.736		900	0.979	1.046
20	0.736		1 000	0.991	1.046
100	0.782	0.836	1 100	1.008	
200	0.824	0.878	1 200	1.033	
300	0.861	0.878	1 300	1.058	
400	0.895	0.920	1 400	1.092	
500	0.916	0.962	1 500	1.121	
600	0.937	0.962			
700	0.953	1.004			
800	0.970	1.004			
注 1: 1 200 ℃ 以上的比热, 已包含熔融热。					
注 2: 窑灰的比热, 按一般成分概算。					

附录 C

(规范性附录)

熟料形成热的理论计算方法

熟料形成热是用基准温度(0℃)的干物料,在没有任何物料和热量损失的条件下,制成1 kg 仍为基准温度的熟料所需的热量。

若采用普通原料(石灰石、黏土和铁粉)配料,以煤粉为燃料,可用如下方法计算。

C.1 生成1 kg 熟料,干原料消耗量的计算

C.1.1 生成1 kg 熟料,煤灰的掺入量

生成1 kg 熟料,煤灰的掺入量计算公式见式(C.1):

$$m_A = m_r \times A_{ar} \times \alpha \times \frac{1}{10\,000} \quad \text{..... (C.1)}$$

式中:

m_A ——生产每千克熟料煤灰的掺入量,单位为千克每千克(kg/kg);

m_r ——每千克熟料燃料消耗量,单位为千克每千克(kg/kg);

A_{ar} ——煤粉收到基灰分,以百分数表示(%);

α ——煤灰掺入率,以百分数表示(%).

C.1.2 生成1 kg 熟料,生料中碳酸钙消耗量

生成1 kg 熟料,生料中碳酸钙消耗量计算公式见式(C.2):

$$m_{CaCO_3} = \frac{CaO^{sh} - CaO^A \times m_A}{100} \times \frac{100}{56} \quad \text{..... (C.2)}$$

式中:

m_{CaCO_3} ——生产每千克熟料生料中碳酸钙消耗量,单位为千克每千克(kg/kg);

CaO^{sh} ——熟料中 CaO 含量,以百分数表示(%);

CaO^A ——煤灰中 CaO 含量,以百分数表示(%).

C.1.3 生成1 kg 熟料,生料中碳酸镁消耗量

生成1 kg 熟料,生料中碳酸镁消耗量计算公式见式(C.3):

$$m_{MgCO_3} = \frac{MgO^{sh} - MgO^A \times m_A}{100} \times \frac{84.3}{40.3} \quad \text{..... (C.3)}$$

式中:

m_{MgCO_3} ——生产每千克熟料生料中碳酸镁消耗量,单位为千克每千克(kg/kg);

MgO^{sh} ——熟料中 MgO 含量,以百分数表示(%);

MgO^A ——煤灰中 MgO 含量,以百分数表示(%).

C.1.4 生成1 kg 熟料,生料中高岭土消耗量

生成1 kg 熟料,生料中高岭土消耗量计算公式见式(C.4)

$$m_{\text{AS}_2\text{H}_2} = \frac{\text{Al}_2\text{O}_3^{\text{sh}} - \text{Al}_2\text{O}_3^{\text{A}} \times m_{\text{A}}}{100} \times \frac{258}{102} \quad \text{..... (C. 4)}$$

式中:

$m_{\text{AS}_2\text{H}_2}$ ——生产每千克熟料生料中碳酸镁消耗量,单位为千克每千克(kg/kg);

$\text{Al}_2\text{O}_3^{\text{sh}}$ ——熟料中 Al_2O_3 含量,以百分数表示(%);

$\text{Al}_2\text{O}_3^{\text{A}}$ ——煤灰中 Al_2O_3 含量,以百分数表示(%).

C.1.5 生成 1 kg 熟料,生料中的 CO_2 消耗量

生成 1 kg 熟料,生料中的 CO_2 消耗量计算公式见式(C. 5):

$$m_{\text{CO}_2} = \frac{\text{CaO}^{\text{sh}} - \text{CaO}^{\text{A}} \times m_{\text{A}}}{100} \times \frac{44}{56} + \frac{\text{MgO}^{\text{sh}} - \text{MgO}^{\text{A}} \times m_{\text{A}}}{100} \times \frac{44}{40.3} \quad \text{..... (C. 5)}$$

式中:

m_{CO_2} ——生产每千克熟料生料中 CO_2 消耗量,单位为千焦每千克(kJ/kg)。

C.1.6 生成 1 kg 熟料,生料中的化合水消耗量

生成 1 kg 熟料,生料中的化合水消耗量计算公式见式(C. 6)

$$m_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{\text{Al}_2\text{O}_3^{\text{sh}} - \text{Al}_2\text{O}_3^{\text{A}} \times m_{\text{A}}}{100} \times \frac{36}{102} \quad \text{..... (C. 6)}$$

式中:

$m_{\text{H}_2\text{O}}$ ——生产每千克熟料生料中的化合水消耗量,单位为千焦每千克(kJ/kg)。

C.1.7 生成 1 kg 熟料,干原料的消耗量

生成 1 kg 熟料,干原料的消耗量计算公式见式(C. 7):

$$m_{\text{gy}} = 1 + m_{\text{CO}_2} + m_{\text{H}_2\text{O}} \quad \text{..... (C. 7)}$$

式中:

m_{gy} ——生产每千克熟料,干原料的消耗量,单位为千焦每千克(kJ/kg)。

注 1: 使用部分矿渣配料时,应扣除来自矿渣中各成分的含量计算。

注 2: 使用液体或气体燃料时,公式中的 m_{A} 为零。

C.2 吸收热量的计算

C.2.1 干物料从 0 °C 加热到 450 °C 吸收热量

干物料从 0 °C 加热到 450 °C 吸收热量计算公式见式(C. 8):

$$q_1 = m_{\text{gy}} \times 1.058 \times (450 - 0) \quad \text{..... (C. 8)}$$

式中:

q_1 ——干物料从 0 °C 加热到 450 °C 吸收热量,单位为千焦每千克(kJ/kg);

1.058 ——干物料在 0 °C ~ 450 °C 时的平均比热,单位为千焦每千克摄氏度[kJ/(kg · °C)]。

C.2.2 高岭土吸收热量计算

高岭土吸收热量计算公式见式(C. 9):

$$q_2 = m_{\text{H}_2\text{O}} \times 6\,690 \quad \text{..... (C. 9)}$$

式中:

q_2 ——高岭土吸收热量,单位为千焦每千克(kJ/kg);

6 690 ——高岭土脱水热,单位为千焦每千克(kJ/kg)。

注:一般生产水泥用的黏土主要成分是高岭土,因此,黏土脱水实际是高岭土脱水。

C.2.3 脱水后物料由 450 ℃ 加热到 900 ℃ 吸收热量

脱水后物料由 450 ℃ 加热到 900 ℃ 吸收热量计算公式见式(C.10):

$$q_3 = (m_{gy} - m_{H_2O}) \times 1.184 \times (900 - 450) \quad \dots\dots\dots (C.10)$$

式中:

q_3 ——脱水后物料由 450 ℃ 加热到 900 ℃ 吸收热量,单位为千焦每千克(kJ/kg);

1.184 ——脱水后的物料在 450 ℃ ~ 900 ℃ 时的平均比热,单位为千焦每千克摄氏度 [kJ/(kg·℃)]。

C.2.4 碳酸盐分解吸收热量

碳酸盐分解吸收热量计算公式见式(C.11):

$$q_4 = m_{CaCO_3} \times 1\,660 + m_{MgCO_3} \times 1\,420 \quad \dots\dots\dots (C.11)$$

式中:

q_4 ——碳酸盐分解吸收热量,单位为千焦每千克(kJ/kg);

1 660 ——900 ℃ 时碳酸钙分解吸收热量,单位为千焦每千克(kJ/kg);

1 420 ——600 ℃ 时碳酸镁分解吸收热量,单位为千焦每千克(kJ/kg)。

C.2.5 物料由 900 ℃ 加热到 1 400 ℃ 吸收热量

物料由 900 ℃ 加热到 1 400 ℃ 吸收热量计算公式见式(C.12):

$$q_5 = (m_{gy} - m_{H_2O} - m_{CO_2}) \times 1.033 \times (1\,400 - 900) \quad \dots\dots\dots (C.12)$$

式中:

q_5 ——物料由 900 ℃ 加热到 1 400 ℃ 吸收热量,单位为千焦每千克(kJ/kg);

1.033 ——碳酸盐分解后的物料在 900 ℃ ~ 1 400 ℃ 时的平均比热,单位为千焦每千克摄氏度 [kJ/(kg·℃)]。

C.2.6 在 1 400 ℃ 时,液相形成吸收热量

在 1 400 ℃ 时,液相形成吸收热量见下式:

$$q_6 \approx 109 \text{ kJ/kg}$$

式中:

q_6 ——在 1 400 ℃ 时,液相形成吸收热量,单位为千焦每千克(kJ/kg)。

C.3 放出热量的计算

C.3.1 在 1 000 ℃ ~ 1 400 ℃ 范围内,由熟料矿物形成放出热量

在 1 000 ℃ ~ 1 400 ℃ 范围内,由熟料矿物形成放出热量计算公式见式(C.13):

$$q_7 = \frac{1}{100} (C_3S \times 465 + C_2S \times 610 + C_3A \times 88 + C_4AF \times 105) \quad \dots\dots\dots (C.13)$$

式中:

q_7 ——在 1 000 ℃ ~ 1 400 ℃ 范围内,由熟料矿物形成放出热量,单位为千焦每千克(kJ/kg);

465 —— C_3S 形成热,单位为千焦每千克(kJ/kg);

610 —— C_2S 形成热,单位为千焦每千克(kJ/kg);

88 —— C_3A 形成热,单位为千焦每千克(kJ/kg);

105 —— C_4AF 形成热,单位为千焦每千克(kJ/kg)。

熟料矿物形成放热与熟料中各矿物的含量有关,根据熟料的化学成分按式(C.14)、式(C.15)、式(C.16)、式(C.17)计算各矿物的含量:

$$C_3S = 4.07CaO^{sh} - 7.60SiO_2^{sh} - 6.72Al_2O_3^{sh} - 1.43Fe_2O_3^{sh} \quad \dots\dots\dots (C.14)$$

$$C_2S = 8.60SiO_2^{sh} - 3.07CaO^{sh} + 5.10Al_2O_3^{sh} + 1.07Fe_2O_3^{sh} \quad \dots\dots\dots (C.15)$$

$$C_3A = 2.65Al_2O_3^{sh} - 1.69Fe_2O_3^{sh} \quad \dots\dots\dots (C.16)$$

$$C_4AF = 3.04Fe_2O_3^{sh} \quad \dots\dots\dots (C.17)$$

式中:

C_3S 、 C_2S 、 C_3A 、 C_4AF ——分别为熟料中各矿物的含量,以百分数表示(%)。

C.3.2 黏土中无定形物质结晶放出热量

黏土中无定形物质结晶放出热量计算公式见式(C.18):

$$q_8 = m_{As_2H_2} \times 0.86 \times 301 \quad \dots\dots\dots (C.18)$$

式中:

q_8 ——黏土中无定形物质结晶放出热量,单位为千焦每千克(kJ/kg);

0.86 ——偏高岭土($Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$)与高岭土($Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$)分子量之比;

301 ——脱水高岭土结晶热,单位为千焦每千克(kJ/kg)。

C.3.3 熟料由 1 400 °C 冷却到 0 °C 时放出热量

熟料由 1 400 °C 冷却到 0 °C 时放出热量计算公式见式(C.19):

$$q_9 = 1 \times 1.092 \times (1\,400 - 0) \quad \dots\dots\dots (C.19)$$

式中:

q_9 ——熟料由 1 400 °C 冷却到 0 °C 时放出热量 q_9 , 单位为千焦每千克(kJ/kg);

1.092 ——熟料在 0 °C ~ 1 400 °C 时的平均比热,单位为千焦每千克摄氏度[kJ/(kg · °C)]。

C.3.4 碳酸盐分解出的 CO_2 由 900 °C 冷却到 0 °C 时放出热量

碳酸盐分解出的 CO_2 由 900 °C 冷却到 0 °C 时放出热量计算公式见式(C.20):

$$q_{10} = m_{CO_2} \times 1.104 \times (900 - 0) \quad \dots\dots\dots (C.20)$$

式中:

q_{10} ——碳酸盐分解出的 CO_2 由 900 °C 冷却到 0 °C 时放出热量,单位为千焦每千克(kJ/kg);

1.104 —— CO_2 在 0 °C ~ 900 °C 时的平均比热,单位为千焦每千克摄氏度[kJ/(kg · °C)]。

C.3.5 生料中化合水由 450 °C 冷却到 0 °C 时放出热量

生料中化合水由 450 °C 冷却到 0 °C 时,放出热量计算公式见式(C.21):

$$q_{11} = m_{H_2O} \times [1.966 \times (450 - 0) + 2\,496] \quad \dots\dots\dots (C.21)$$

式中:

q_{11} ——生料中化合水,由 450 °C 冷却到 0 °C 时,放出热量,单位为千焦每千克(kJ/kg);

1.966 ——水蒸汽在 0 °C ~ 450 °C 时的平均比热,单位为千焦每千克摄氏度[kJ/(kg · °C)];

2 496 ——0 °C 时水的汽化潜热,单位为千焦每千克摄氏度[kJ/(kg · °C)]。

C.4 熟料形成热

熟料形成热计算公式见式(C.22)：

$$Q_{sh} = (q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6) - (q_7 + q_8 + q_9 + q_{10} + q_{11}) \quad \cdots \cdots \cdots (C.22)$$

式中：

Q_{sh} ——熟料形成热，单位为千焦每千克(kJ/kg)。

中 华 人 民 共 和 国
国 家 标 准
水泥回转窑热平衡、热效率、
综合能耗计算方法
GB/T 26281—2010

*

中国标准出版社出版发行
北京复兴门外三里河北街16号
邮政编码:100045

网址 www.spc.net.cn

电话:68523946 68517548

中国标准出版社秦皇岛印刷厂印刷
各地新华书店经销

*

开本 880×1230 1/16 印张 2.5 字数 62 千字
2011年6月第一版 2011年6月第一次印刷

*

书号: 155066·1-42210 定价 36.00 元

如有印装差错 由本社发行中心调换
版权专有 侵权必究
举报电话:(010)68533533



GB/T 26281-2010