



中华人民共和国国家标准

GB/T 23459—2009

陶瓷工业窑炉热平衡、热效率 测定与计算方法

Measurement and calculation method of
heat balance and thermal efficiency
for ceramic industrial kiln

2009-03-28 发布

2010-01-01 实施



中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局
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 体系划分、计算基准、测试时间、基准温度及方框图..... 1

4 测定内容及测定方法 1

5 热平衡计算方法 5

6 热效率计算方法 9

附录 A（资料性附录） 各类数据表 11

附录 B（资料性附录） 燃料燃烧理论空气量与理论烟气量及燃烧生成干烟气量和生成水蒸气量的
计算 14

附录 C（资料性附录） 测定气体流量时测点的选择与计算方法 17

前 言

本标准的附录 A、附录 B、附录 C 为资料性附录。

本标准由中国建筑材料联合会提出。

本标准由全国建筑卫生陶瓷标准化技术委员会(SAC/TC 249)归口。

本标准负责起草单位:咸阳陶瓷研究设计院。

本标准参加起草单位:潮州市陶瓷行业协会。

本标准主要起草人:温伟明、蔡镇城、刘继武。

请注意本标准的某些内容有可能涉及专利。本标准的发布机构不应承担识别这些专利的责任。

本标准自实施之日起,JC/T 763—2005《陶瓷工业隧道窑热平衡热效率测定与计算方法》废止。

陶瓷工业窑炉热平衡、热效率 测定与计算方法

1 范围

本标准规定了陶瓷工业窑炉的热平衡、热效率的测定与计算方法。

本标准适用于使用液体和气体燃料生产陶瓷产品的梭式窑、隧道窑热平衡、热效率的测定与计算。对于其他形式窑炉热平衡、热效率的测定与计算也可参照采用本标准。

2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过本标准的引用而成为本标准的条款。凡是注日期的引用文件，其随后所有的修改单（不包括勘误的内容）或修订版均不适用于本标准，然而，鼓励根据本标准达成协议的各方研究是否可使用这些文件的最新版本。凡是不注日期的引用文件，其最新版本适用于本标准。

GB/T 384 石油产品热值测定法

GB/T 12206 城镇燃气热值和相对密度测定方法

3 体系划分、计算基准、测试时间、基准温度及方框图

3.1 窑炉热平衡体系，只取窑体本身。

3.2 以 1 t 出窑成品的热量消耗为计算基准。隧道窑在热稳定情况下进行测定计算，梭式窑则将一个周期划分为若干阶段分别测定，取其平均值计算。

注：本标准中 m^3 为标准立方米符号。

3.3 以车间环境温度为基准温度。

3.4 热平衡方框图

热平衡计算前，为防止热收、支项目的重复和遗漏，根据窑炉具体情况详细作出热平衡方框图，见图 1 热平衡方框示意图。

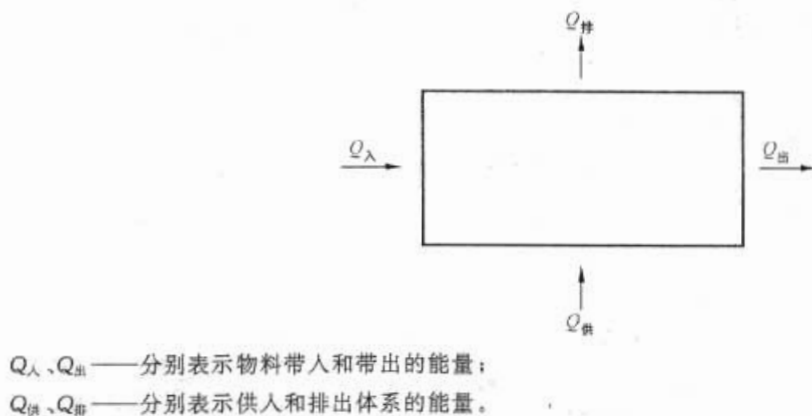


图 1 热平衡方框示意图

4 测定内容及测定方法

4.1 燃料

其测定内容和测定方法按表 1 的规定进行。

表1 燃料测定内容及测定方法

测定内容	测定时间	测点位置	测定方法
组成/%	在测定周期内择时取样	入窑前利用旁路管道取样	液体燃烧作元素分析,气体燃料用气体分析仪或其他仪器作全分析
低位发热量/(kJ/kg 或 kJ/m ³)	在测定周期内择时取样		按 GB/T 384 和 GB/T 12206 或其他方法实测
温度/℃	油、气燃料应全周期记录	入窑前管道上测定	用玻璃温度计、电阻温度计或其他仪器测量,取平均值
燃料消耗量/(kg/h 或 m ³ /h)	全测定周期	入窑前管道上测定	油用流量计或液位计测量,气用流量计测量。煤气流量也可用毕托管及其他仪器测量或通过对煤气发生炉作物料衡算求得,瓶装气用磅秤称量

4.2 助燃空气、冷却空气及烟气

其测定内容和测定方法按表2的规定进行,流量也可用其他方法直接测定。

表2 助燃空气、冷却空气及烟气测定内容及测定方法

测定内容	测定时间	测点位置	测定方法
助燃及冷却空气	隧道窑:每隔2h~4h测一次 梭式窑:分阶段测定	总管道直管部位(>3D)按附录C确定测点数	用毕托管、微压计或用其他仪器测定
	隧道窑:每隔2h~4h测一次 梭式窑:分阶段测定	离窑1m~2m处管道截面中心点	用热电偶或0℃~300℃水银温度计或用其他仪器测定
烟气	隧道窑:每隔2h~4h测一次 梭式窑:分阶段测定	在汇总烟道直管部位(>3D)可按附录C确定测点数	用毕托管、微压计或用其他仪器测定
	隧道窑:每隔2h~4h测一次 梭式窑:分阶段测定	测动压的截面中心点	用气体分析仪或其他仪器测量
	隧道窑:每隔2h~4h测一次 梭式窑:分阶段测定	测动压的截面中心点	用热电偶或0℃~300℃水银温度计或其他仪器测定
	隧道窑:每隔2h~4h测一次 梭式窑:分阶段测定	测动压的截面中心点	用湿含量测定仪测定

4.3 生坯(半成品)、成品

其测定内容和测定方法按表3的规定进行。

表3 生坯(半成品)、成品测定内容及测定方法

测定内容	测定时间	测点位置	测定方法
粘土含量/%			由配方得到。
质量 对隧道窑/(kg/h) 对梭式窑/kg	隧道窑:全周期; 梭式窑:装窑时		隧道窑:根据各品种的单坯质量、数量抽取称量,按入(窑)车速度计算得出; 梭式窑:按各品种的质量、数量抽取称量并计算

表 3 (续)

测定内容		测定时间	测点位置	测定方法
生坯(半成品)	入窑温度/℃	隧道窑:每隔 2 h~4 h 测一次; 梭式窑:装窑时	窑车最上层和中部或辊道左、中、右处的坯体	用表面温度计或点温计测定
	吸附水分/%	隧道窑:每隔 2 h~4 h 测一次; 梭式窑:装窑时		用精度为 0.01 g 的天平测定坯体并计算
	结晶水分/%	隧道窑:每隔 2 h~4 h 测一次; 梭式窑:装窑时		用化学分析测取
成品	出窑产品质量/(t/h)	隧道窑:每隔 2 h~4 h 测量; 梭式窑:出窑时	各类型成品各取 3 件(片)	隧道窑:分品种称,取平均值后再按总数和进车速度计算; 梭式窑:分品种按总数计算
	隧道窑出窑产品温度/℃	窑车出窑 5 min 内测定	窑车前、后、左、右及中部或辊道左、中、右处的成品	用表面温度计或点温计测定
	最高烧成温度/℃	隧道窑:全周期; 梭式窑:高温保温阶段	隧道窑:烧成带最高温度断面上; 梭式窑:窑门上部附近	用铂铑-铂热电偶、三角锥、测温环等测定

4.4 匣钵、窑具及窑车

其测定内容和测定方法按表 4 的规定进行。

表 4 匣钵、窑具及窑车测定内容及测定方法

测定内容		测定时间	测点位置	测定方法
匣钵和窑具	质量/kg	隧道窑:每隔 2 h~4 h 测一次; 梭式窑:装窑时	按品种各抽取 3 件	隧道窑:分品种称,取平均值后再按总数和进车速度计算; 梭式窑:分品种按总数计算
	匣钵窑具出入窑平均温度/℃	隧道窑:窑车出窑后及入窑前 5 min 内测定; 梭式窑:装窑时	窑车前、后、左、右、中部测量,取平均值	用表面温度计或点温计测定
窑车	金属及耐火材料质量/(kg/车)	进窑前		地磅上称量
	金属部分出入窑温度/℃	隧道窑:每隔 2 h~4 h 测一次,出入窑 5 min 内测量; 梭式窑:进窑前	测前、后及轮三个点,取平均值	用表面温度计或点温计测定
	耐火材料出入窑温度/℃	隧道窑:每隔 2 h~4 h 测一次,出入窑 5 min 内测量; 梭式窑:进窑前	测表面四个角和中心五个点取平均值为表面温度;四面衬砖内部中心四个点取平均值为内部温度,再取内外平均值	用表面温度计或点温计测定
	隧道窑:进车速度/(车/h); 梭式窑:装车数/(车/窑)			

4.5 窑墙、窑顶

其测定内容和测定方法按表 5 的规定进行。

表 5 窑墙、窑顶测定内容及测定方法

测定内容		测定时间	测点位置	测定方法	
窑墙、窑顶	隧道窑	外表面温度/℃ 或热流/(W/m ²)	测试开始时进行	先用点温计或表面温度计找出表面温度变化相近的区域定为一测区,原则上测区长度不超过 20 m,或温差不超过 10℃。各测区选若干测点取平均值	用表面温度计、点温计测取表面温度平均值,或用热流计测取平均值
	梭式窑	内表面温度/℃	点火前	选有体表性若干测点	用表面温度计、点温计测取表面温度,取平均值
			高温及保温阶段	选有体表性若干测点	用制品表面温度作为内表面温度,或用热电偶分别测取各层不同材质温度
		外表面温度/℃	点火前	选有体表性若干测点	用表面温度计、点温计测取表面温度,取平均值
			高温及保温阶段	选有体表性若干测点	用表面温度计、点温计测取表面温度,取平均值
		质量/kg		按图纸计算或实测	由实测尺寸及密度(参见附录 A 的表 A.2)计算质量
	周围空气温度/℃		每隔 2 h~4 h 测一次	隧道窑:每隔 2 h~4 h; 梭式窑:全周期内各烧成阶段; 在距窑外 1 m 处若干有代表性的点测一次,测量后平均值	用玻璃温度计或其他仪器测定
	表面积/m ²		测试开始时进行		用米尺或其他仪器测定后计算

4.6 热平衡项目及热平衡表见表 6。由于窑炉种类很多,燃料不一,工艺过程也有所不同,可根据具体情况对表 6 中的收、支项目进行增删。

表 6 热平衡项目及热平衡表

热量收入 ^a Q			热量支出 Q'		
项 目	热量/ kJ	%	项 目	热量/ kJ	%
燃料燃烧热 Q ₁			隧道窑成品带出显热	Q' ₁	
			梭式窑坯体加热到烧成温度所需热量		
燃料显热 Q ₂			坯体水分蒸发和加热水蒸气耗热 Q' ₂		
巨体及窑具带入显热 Q ₃			坯体烧成过程分解粘土耗热 Q' ₃		

表 6 (续)

热量收入 ^a Q			热量支出 Q'		
项 目	热量/ kJ	%	项 目	热量/ kJ	%
窑车带入显热 Q ₁			隧道窑冷却带抽出热风带出显热 Q' ₁		
生坯带入显热 Q ₂			隧道窑匣钵和窑具带出显热	Q' ₂	
			梭式窑加热匣钵和窑具所需热量		
重油雾化用蒸汽或乳化用水带入显热 Q ₃			隧道窑窑车带出显热 Q' ₃		
用于气幕的回收热风带入显热 Q ₄			烟气带出显热 Q' ₄		
梭式窑升温前窑体蓄积热量 Q ₅			化学不完全燃烧热损失 Q' ₅		
			窑体表面散热损失 Q' ₆		
			梭式窑烧成温度下窑体蓄积热量 Q' ₇		
			其他散热损失 Q' ₈		
合计		100	合计		100
^a 以环境温度为基准,助燃空气、急冷冷风、窑尾冷风、不严密处漏入空气、车下渗入冷风等热收入项目为零,表中未列出。					

5 热平衡计算方法

5.1 热收入

5.1.1 燃料燃烧热 Q₁ (kJ)

$$Q_1 = m_r \times Q_{Dw}^y \dots\dots\dots (1)$$

式中:

m_r ——1 t 成品的燃料消耗量,kg 或 m³;
 Q_{Dw}^y ——应用基时燃料的低位发热量,kJ/kg 或 kJ/m³,以实测为准。

5.1.2 燃料显热 Q₂ (kJ)

$$Q_2 = m_r \times c_r \times (t_r - t) \dots\dots\dots (2)$$

式中:

c_r ——燃料的比热容,kJ/(kg·℃)或 kJ/(m³·℃);
 t_r ——燃料入窑温度,℃;
 t ——基准温度,℃。

液体燃料的比热容按实测或按式(3)计算,气体燃料的比热容按实测或按式(4)计算。

$$c_r = 1.735 + 0.0025 \times t_r \dots\dots\dots (3)$$

$$c_r = 0.01 \sum (\varphi_i \times c_i) \dots\dots\dots (4)$$

式中:

φ_i ——各气体成分在燃料或烟气中的体积分数;
 c_i ——各气体成分的平均比热容,kJ/(m³·℃),参见附录 A 表 A.1。

5.1.3 匣钵及窑具带入显热 Q₃ (kJ)

$$Q_3 = m_b \times c_b \times (t_b - t) \dots\dots\dots (5)$$

式中:

m_b ——1 t 成品需要的匣钵及窑具质量, kg;

c_b ——匣钵及窑具的比热容, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$, 参见附录 A 表 A. 2;

t_b ——匣钵及窑具入窑的温度, $^\circ\text{C}$ 。

5.1.4 窑车带入显热 Q_4 (kJ)

$$Q_4 = m_j \times c_j \times (t_j - t) + m_n \times c_n \times (t_n - t) \dots\dots\dots (6)$$

式中:

m_j, m_n ——分别表示 1 t 成品的窑车金属、耐火材料的质量, kg;

c_j, c_n ——分别表示窑车金属、耐火材料的比热容, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$, 参见附录 A 表 A. 2;

t_j, t_n ——分别表示窑车金属和耐火材料入窑的温度, $^\circ\text{C}$ 。

5.1.5 生坯带入显热 Q_5 (kJ)

$$Q_5 = m_{sp} \times c_{sp} \times (t_{sp} - t) \dots\dots\dots (7)$$

式中:

m_{sp} ——1 t 成品的生坯质量, kg;

c_{sp} ——生坯的平均比热容, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$, 参见附录 A 表 A. 2;

t_{sp} ——生坯入窑温度, $^\circ\text{C}$ 。

5.1.6 重油雾化用蒸汽或乳化用水带入显热 Q_6 (kJ)

$$Q_6 = m_t \times \frac{m_s}{m_t} \times c_s \times (t_s - t) \dots\dots\dots (8)$$

式中:

m_s ——重油雾化用蒸汽或乳化用水量, kg/h;

m_t ——1 h 的重油消耗量, kg/h;

c_s ——水蒸气的比热容 $1.93 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ 或水的比热容 $4.1816 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$;

t_s ——重油雾化用蒸汽或乳化用水温度, $^\circ\text{C}$ 。

5.1.7 用于气幕的回收热风带入显热 Q_7 (kJ)

$$Q_7 = V_q \times c_q \times (t_q - t) \dots\dots\dots (9)$$

式中:

V_q ——1 t 成品的气幕热风量, m^3 , 其计算参见附录 C;

c_q ——气幕热风的比热容, $\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$, 参见附录 A 表 A. 1 或按式(10)计算;

t_q ——吸入热风温度, $^\circ\text{C}$ 。

$$c_q = 1.284 + 0.0001199 \times t_q \dots\dots\dots (10)$$

5.1.8 梭式窑升温前窑体蓄积热量 Q_8 (kJ)

$$Q_8 = \frac{\sum [m_p \times c_p \times (t_p - t)]}{m} \dots\dots\dots (11)$$

式中:

m_p ——梭式窑窑体各部分(顶、墙、底)耐火材料的质量, kg;

c_p ——梭式窑窑体各耐火材料的平均比热容, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$, 参见附录 A 表 A. 2;

t_p ——梭式窑窑体内、外表面的平均温度, $^\circ\text{C}$;

m ——成品的总质量, t。

5.2 热支出

5.2.1 隧道窑成品带出显热 Q'_1 (kJ)

$$Q'_1 = 1000 \times c_c \times (t_c - t) \dots\dots\dots (12)$$

式中:

c_c ——成品的平均比热容, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$, 参见附录 A 表 A. 2;

t_c ——窑出口处成品的温度, $^\circ\text{C}$ 。

梭式窑坯体加热到烧成温度所需热量 Q'_1 (kJ)

$$Q'_1 = 1\,000 \times c_c \times (t_{zg} - t_{sp}) \quad \dots\dots\dots (13)$$

式中:

t_{zg} ——产品的最高烧成温度, $^\circ\text{C}$ 。

5.2.2 坯体水分蒸发和加热水蒸气耗热 Q'_2 (kJ)

$$Q'_2 = (m_x + m_j) \times [2\,490 + 1.93 \times (t_y - t)] \quad \dots\dots\dots (14)$$

式中:

m_x ——1 t 成品入窑坯体中所含吸附水量, kg;

m_j ——1 t 成品入窑坯体中所含结晶水量, kg;

2 490——在 0°C 时, 1 kg 水蒸气汽化所需潜热, kJ/kg ;

1.93——在烟气离窑温度范围内水蒸气的平均比热容, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$;

t_y ——离窑烟气的温度, $^\circ\text{C}$ 。

5.2.3 坯体烧成过程分解黏土耗热 Q'_3 (kJ)

$$Q'_3 = m_t \times q_t \quad \dots\dots\dots (15)$$

式中:

m_t ——1 t 成品生坯中的黏土量, kg;

q_t ——分解 1 kg 黏土所需热, 为 1 088 kJ/kg 。

5.2.4 隧道窑冷却带抽出热风带出显热 Q'_4 (kJ)

$$Q'_4 = V_c \times c_{cr} \times (t_{cr} - t) \quad \dots\dots\dots (16)$$

式中:

V_c ——1 t 成品的抽出热风量, m^3 , 其计算参见附录 C;

c_{cr} —— t_{cr} 下热风的比热容, $\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$, 参见附录 A 表 A. 1 或按式(10)计算;

t_{cr} ——抽出热风温度, $^\circ\text{C}$ 。

5.2.5 隧道窑匣钵和窑具带出显热 Q'_5 (kJ)

$$Q'_5 = m_b \times c_b \times (t_{bc} - t) \quad \dots\dots\dots (17)$$

式中:

t_{bc} ——匣钵及窑具窑出口处的温度, $^\circ\text{C}$ 。

梭式窑加热匣钵和窑具所需热量 Q'_5 (kJ)

$$Q'_5 = m_b \times c_b \times (t_{zg} - t_b) \quad \dots\dots\dots (18)$$

5.2.6 隧道窑窑车带出显热 Q'_6 (kJ)

$$Q'_6 = m_j \times c_j \times (t_{jc} - t) + m_n \times c_n \times (t_{nc} - t) \quad \dots\dots\dots (19)$$

式中:

t_{jc} 、 t_{nc} ——分别表示窑车金属和耐火材料窑出口处的温度, $^\circ\text{C}$ 。

5.2.7 烟气带出显热 Q'_7 (梭式窑则分阶段合计) (kJ)

$$Q'_7 = Q'_g + Q'_s \quad \dots\dots\dots (20)$$

式中:

Q'_g ——干烟气带出显热, kJ ;

Q'_s ——烟气中水蒸气带出显热, kJ 。

5.2.7.1 干烟气带出的显热 Q'_g (kJ)

$$Q'_g = m_r \times V_g \times c_g \times (t_g - t) \quad \dots\dots\dots (21)$$

式中:

V_g ——1 kg 或 1 m³ 燃料燃烧后实际生成的干烟气量, m³; V_g 的计算方法参见附录 B;

t_g ——干烟气离窑温度, °C;

c_g ——干烟气的比热容, kJ/(m³ · °C), 可近似取 1.384 kJ/(m³ · °C) 或按式(4)求得。

5.2.7.2 烟气中水蒸气带出显热 Q'_s (kJ)

$$Q'_s = m_r \times \left[s_s \times c_s \times (t_g - t) + 2490 \times \frac{m_s}{m_r} \right] \quad (22)$$

式中:

s_s ——每 1 kg 或每 1 m³ 燃料产生的烟气中的水蒸气量, kg; s_s 的计算参见附录 B。

5.2.8 化学不完全燃烧热损失 Q'_8 (梭式窑则分阶段合计) (kJ)

$$Q'_8 = m_r \times V_g \times \varphi_{co} \times 12750 \quad (23)$$

式中:

φ_{co} ——烟气中一氧化碳的体积分数, %;

12750——一氧化碳的反应热, kJ/m³。

5.2.9 窑体表面散热损失 Q'_9 (kJ)

对隧道窑分段计算:

$$Q'_9 = \frac{3.6 \times \alpha \times (t_w - t_f) \times F}{M} \quad (24)$$

式中:

α ——窑壁与空气间的对流辐射传热系数, W/(m² · °C), 见式(25);

t_w, t_f ——分别表示窑壁外表面和周围环境温度, °C;

F ——散热面积, m²;

M ——1 h 的成品质量, t/h。

$$\alpha = A_w \sqrt[4]{t_w - t_f} + 4.54 \times \frac{[(273 + t_w)/100]^4 - [(273 + t_f)/100]^4}{t_w - t_f} \quad (25)$$

式中:

A_w ——散热面位置系数, 窑顶取 3.26, 窑墙取 2.56, 梭式窑窑底(窑车)取 2.1。

用热流计法计算时:

$$Q'_9 = \frac{3.6 \times q \times F}{M} \quad (26)$$

式中:

q ——各个测区的平均热流密度, W/m²。

对梭式窑按窑顶、窑墙、窑底按阶段分别计算后求和:

$$Q'_9 = \frac{3.6 \sum [\alpha \times (t_w - t_f) \times F \times \Delta H]}{m} \quad (27)$$

式中:

ΔH ——烧成中各相应阶段的时间间隔, h。

用热流计法计算时:

$$Q'_9 = \frac{3.6 \times \sum (q \times F)}{m} \quad (28)$$

5.2.10 梭式窑烧成温度下窑体蓄积热量 Q'_{10} (kJ)

$$Q'_{10} = \frac{\sum [m_n \times c_n \times (t_n - t)]}{m} \quad (29)$$

5.2.11 其他散热损失 Q'_{11} (kJ)

隧道窑: $Q'_{11} = (Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 + Q_7) - (Q'_1 + Q'_2 + Q'_3 + Q'_4 + Q'_5 + Q'_6 + Q'_7 + Q'_8 + Q'_9)$

$$\quad (30)$$

$$\text{梭式窑: } Q'_{11} = (Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 + Q_8) - (Q'_1 + Q'_2 + Q'_3 + Q'_5 + Q'_7 + Q'_8 + Q'_9 + Q'_{10}) \quad \dots\dots\dots (31)$$

6 热效率计算方法

6.1 烧成产品的有效热 Q_{yx} (kJ)

$$Q_{yx} = Q'_2 + Q'_3 + Q'_4 \quad \dots\dots\dots (32)$$

式中:

Q'_2 ——坯体吸附水分、结晶水分的蒸发及水蒸气加热所需要的热量, kJ。

$$Q'_2 = m_x \times [(100 - t_{sp}) \times 4.18 + 2\,260 + (125 - 100) \times 1.93] + m_j \times [(100 - t_{sp}) \times 4.18 + 2\,260 + (550 - 100) \times 1.93] \quad \dots\dots\dots (33)$$

式中:

125——吸附水蒸发终温, °C;

550——结晶水蒸发终温, °C;

2 260——水在 100 °C 的汽化潜热, kJ/kg;

Q'_3 ——坯体烧成过程分解黏土耗热, kJ;

$$Q'_3 = Q'_5 \quad \dots\dots\dots (34)$$

Q'_4 ——焙烧至最高烧成温度时耗热, kJ。

$$Q'_4 = 1\,000 \times c_c \times (t_{zg} - t_{sp}) \quad \dots\dots\dots (35)$$

6.2 包括匣钵和窑具在内的每吨成品的有效热 Q'_{yx} (kJ)

$$Q'_{yx} = Q_{yx} + Q'_{12} \quad \dots\dots\dots (36)$$

式中:

Q'_{12} ——加热匣钵及窑具至烧成温度所需热量, kJ。

$$Q'_{12} = m_b \times c_b \times (t_{zg} - t_b) \quad \dots\dots\dots (37)$$

6.3 供给热 Q_{gi} (kJ)

$$Q_{gi} = Q_1 \quad \dots\dots\dots (38)$$

6.4 烧成产品的窑炉热效率 η_1 (%)

$$\eta_1 = \frac{Q_{yx}}{Q_{gi}} \times 100 \quad \dots\dots\dots (39)$$

6.5 包括匣钵和窑具在内的窑炉热效率 η_2 (%)

$$\eta_2 = \frac{Q'_{yx}}{Q_{gi}} \times 100 \quad \dots\dots\dots (40)$$

6.6 单位合格产品烧成燃耗 Q_{nh} (kgce/t)

$$Q_{nh} = \frac{Q_{gi}}{29\,307 \times \eta} \quad \dots\dots\dots (41)$$

式中:

η ——产品的烧成合格率, %;

29 307——1 kg 标准煤(kgce)的低(位)发热量, kJ/kgce。

6.7 余热利用率 η_3 (%)

$$\eta_3 = \frac{Q'_4 + Q'_{13}}{Q_{gi}} \times 100 \quad \dots\dots\dots (42)$$

式中:

Q'_{13} ——烟气中已利用的热, kJ。

$$Q'_{13} = V_{y1} \times [c_{y1} \times (t_{y1} - t)] - V_{yc} \times [c_{yc} \times (t_{yc} - t)] \quad \dots\dots\dots (43)$$

式中:

V_{yj} 、 V_{yc} ——分别表示以 1 t 成品计的进、出余热装置烟气量, m^3 , 其计算参见附录 C;

c_{yj} 、 c_{yc} ——分别表示进、出余热装置烟气的平均比热容, $kJ/(m^3 \cdot ^\circ C)$, 参见公式(4);

t_{yj} 、 t_{yc} ——分别表示进、出余热装置烟气的温度, $^\circ C$ 。

6.8 窑炉综合热效率 η_4 (%)

$$\eta_4 = \frac{Q_{yx} + Q'_4 + Q'_{13}}{Q_{\text{总}}} \times 100 \quad \dots\dots\dots (44)$$

附录 A
(资料性附录)
各类数据表

表 A.1 各种气体的平均比热容 c_t kJ/(m³·℃)

温度/ ℃	H ₂	N ₂	CO	O ₂	H ₂ O	CO ₂	干空 气	湿空 气	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	H ₂ S	SO ₂	发生 炉煤 气	一般 煤气
0	1.275	1.296	1.300	1.304	1.488	1.597	1.300	1.321	1.563	1.869	2.061	3.043	4.122	1.530	1.777	1.350	1.421
100	1.287	1.300	1.301	1.317	1.501	1.697	1.304	1.325	1.651	2.103	2.061	3.959	5.250	1.559	1.860	1.359	
200	1.296	1.301	1.308	1.333	1.513	1.793	1.308	1.333	1.764	2.324	2.278	4.828	6.358	1.593	1.935	1.367	1.438
300	1.300	1.304	1.317	1.354	1.534	1.877	1.317	1.342	1.889	2.525	2.491	5.568	7.286	1.626	2.011	1.371	
400	1.301	1.317	1.329	1.375	1.555	1.923	1.329	1.354	2.019	2.717	2.684	6.207	8.101	1.660	2.069	1.379	1.455
500	1.304	1.325	1.342	1.396	1.580	1.998	1.342	1.367	2.140	2.888	2.859	6.772	8.811	1.697	2.123	1.388	
600	1.308	1.338	1.359	1.414	1.605	2.052	1.354	1.384	2.266	3.043	3.022	7.261	9.434	1.739	2.169	1.396	1.488
700	1.313	1.354	1.372	1.434	1.630	2.098	1.371	1.396	2.378	3.185	3.164			1.777	2.207	1.405	
800	1.317	1.367	1.388	1.450	1.655	2.140	1.384	1.409	2.491	4.180	3.302			1.814	2.236	1.410	1.517
900	1.321	1.379	1.400	1.463	1.685	2.178	1.396	1.425	2.592	3.444	3.428					1.417	
1 000	1.325	1.392	1.413	1.476	1.710	2.215	1.409	1.438	2.692	3.561	3.541					1.425	1.542

表 A.2 材料的密度及其比热容经验计算公式

材料名称	密度×10 ³ /(kg/m ³)	在 t ℃ 时比热容/[kJ/(kg·℃)]
黏土砖	2.1~2.2	$0.84+2.6\times 10^{-4}t$
高铝砖	2.2~2.75	$0.84+2.6\times 10^{-4}t$
刚玉耐火材料	2.6~2.9	$t\leq 800$ ℃ 时 $0.42+8.8\times 10^{-4}t$
		$t>800$ ℃ 时 $0.8+4.18\times 10^{-4}t$
硅线石耐火材料	2.2~2.6	$0.67+1.67\times 10^{-4}t$
莫来石砖	2.2~2.9	$0.67+1.26\times 10^{-4}t$
建筑红砖	1.8~1.9	$0.84+2.6\times 10^{-4}t$
硅砖	1.9	$0.8+3.3\times 10^{-4}t$
镁砖	2.6~2.7	$0.94+2.5\times 10^{-4}t$
铬镁砖	2.9~3	$0.75+1.5\times 10^{-4}t$
热稳定性铬镁砖	3~3.3	$0.75+1.5\times 10^{-4}t$
镁尖晶石砖	3	$0.77+3\times 10^{-4}t$
镁橄榄石砖	3	$0.89+4.2\times 10^{-4}t$
镁质耐火材料	3.3	$0.50+1.67\times 10^{-4}t$

表 A.2 (续)

材料名称	密度 $\times 10^3 / (\text{kg}/\text{m}^3)$	在 t °C 时比热容 $/[\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})]$
锆英石质耐火材料	3.2~3.3	$0.63 + 1.26 \times 10^{-4} t$
不透明石英砖	2.2	$t \leq 800$ °C 时 $0.73 + 3.76 \times 10^{-4} t$
		$t > 800$ °C 时 $0.9 + 1.67 \times 10^{-4} t$
碳化硅耐火材料	2~2.5	$0.96 + 1.5 \times 10^{-4} t$
炭砖	1.35~1.6	0.84~1.26
石墨砖	1.6~1.8	0.84~1.67
轻质硅砖	1.1	$0.8 + 3.34 \times 10^{-4} t$
轻质黏土砖	0.8~1.2	$0.84 + 2.6 \times 10^{-4} t$
轻质高铝砖	1.33	$0.84 + 2.6 \times 10^{-4} t$
轻质硅藻土砖	0.75~1.1	0.84~0.92
耐火黏土粉	1	0.84~5.25
矿渣棉	0.3	0.89
硅酸铝耐火纤维针刺毡	0.1~0.13	$0.8 + 2.93 \times 10^{-4} t$
硅藻土粉	0.5	
矾土水泥黏土质耐火混凝土	2.2	
轻质耐火混凝土(泡沫高岭土骨架)	1.3	
轻质高强耐火混凝土(高温陶粒骨料)	1.5	
矾土水泥珍珠岩制品	0.4	
水玻璃珍珠岩制品	0.3	
石棉水泥板	0.3~0.4	
蛭石	0.25	
钢材	7.7~7.9	0.46

表 A.3 各温度下饱和水蒸气的分压 P_s

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

表 A.4 常用气体的密度

名 称	化 学 式	密度, ρ_0 kg/m ³
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
水蒸气	H ₂ O	0.804

表 A.5 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	$\frac{100}{100 - A^d}$
可燃基	$\frac{100 - (W^y + A^y)}{100}$	$\frac{100 - (W^f + A^f)}{100}$	$\frac{100 - A^d}{100}$	1

附录 B

(资料性附录)

燃料燃烧理论空气量与理论烟气量
及燃烧生成干烟气量和生成水蒸气量的计算

B.1 液体和气体燃料燃烧理论空气量与理论烟气量的分析计算法

B.1.1 液体燃料燃烧理论空气量与理论烟气量的分析计算法

$$V_k^0 = 0.0889\varphi_{C^*} + 0.2667\left(\varphi_{H^*} - \frac{\varphi_{O^*}}{8}\right) + 0.0333\varphi_{S^*} \quad \text{.....(B.1)}$$

$$V_y^0 = V_k^0 + 0.056\varphi_{H^*} + 0.007\varphi_{O^*} + 0.008\varphi_{N^*} + 0.0124\varphi_{W^*} \quad \text{.....(B.2)}$$

式(B.1)和式(B.2)中:

 V_k^0 ——液体燃料燃烧理论空气量, m^3/kg ; V_y^0 ——液体燃料燃烧理论烟气量, m^3/kg ; φ_{C^*} 、 φ_{H^*} 、 φ_{O^*} 、 φ_{S^*} 、 φ_{N^*} 、 φ_{W^*} ——分别为燃料中各组分应用基百分数,基准换算系数参见附录 A 中表 A.5。

B.1.2 气体燃料燃烧理论空气量与理论烟气量的分析计算法

$$V_k^0 = 0.0238(\varphi_{CO^*} + \varphi_{H_2^*}) + 0.0952\varphi_{CH_4^*} + 0.0476\left(m + \frac{n}{4}\right)\varphi_{C_mH_n^*} \\ + 0.0714\varphi_{H_2S^*} - 0.0476\varphi_{O_2^*} \quad \text{.....(B.3)}$$

$$V_y^0 = \left[\varphi_{CO^*} + \varphi_{H_2^*} + 3\varphi_{CH_4^*} + \left(m + \frac{n}{2}\right)\varphi_{C_mH_n^*} + \varphi_{N_2^*} + \varphi_{CO_2^*} + 2\varphi_{H_2S^*} + \varphi_{SO_2^*} + \varphi_{H_2O^*}\right] \\ \times \frac{1}{100} + 0.79V_k^0 \quad \text{.....(B.4)}$$

式(B.3)和式(B.4)中:

 V_k^0 ——气体燃料燃烧理论空气量, m^3/m^3 ; V_y^0 ——气体燃料燃烧理论烟气量, m^3/m^3 ; φ_{CO^*} 、 $\varphi_{H_2^*}$ 、 $\varphi_{CH_4^*}$ 、 $\varphi_{C_mH_n^*}$ 、 $\varphi_{H_2S^*}$ 、 $\varphi_{O_2^*}$ 、 $\varphi_{N_2^*}$ 、 $\varphi_{CO_2^*}$ 、 $\varphi_{SO_2^*}$ 、 $\varphi_{H_2O^*}$ ——分别为燃料中以湿成分表示的各组分百分数。

B.2 液体和气体燃料燃烧理论空气量与理论烟气量的近似计算法

分别见表 B.1 和表 B.2。

表 B.1 液体燃料燃烧理论空气量与理论烟气量的近似计算法

类 别	Q_{Dw}^0 (kJ/kg): 37 620~46 000
V_k^0 (m^3/kg)	$\frac{0.20Q_{Dw}^0}{1000} + 2.0$
V_y^0 (m^3/kg)	$\frac{0.26Q_{Dw}^0}{1000}$

表 B.2 气体燃料燃烧理论空气量与理论烟气量的近似计算法

类 别	煤 气		焦炉和高炉 混合煤气	天 然 气	
Q_{DW}^0 (kJ/kg)	<12 540	>12 540	—	<35 760	>35 760
V_k^0 (m ³ /m ³)	$\frac{0.209Q_{DW}^0}{1\,000}$	$\frac{0.26Q_{DW}^0}{1\,000} - 0.25$	$\frac{0.24Q_{DW}^0}{1\,000} - 0.2$	$\frac{0.265Q_{DW}^0}{1\,000} + 0.05$	$\frac{0.265Q_{DW}^0}{1\,000}$
V_y^0 (m ³ /m ³)	$\frac{0.174Q_{DW}^0}{1\,000} + 1.0$	$\frac{0.27Q_{DW}^0}{1\,000} + 0.25$	$\frac{0.226Q_{DW}^0}{1\,000} + 0.765$	$\frac{0.265Q_{DW}^0}{1\,000} + 0.05$	$\frac{0.28Q_{DW}^0}{1\,000} + 0.38$

B.3 空气过剩系数的计算

$$\alpha_y = \frac{V_k}{V_k^0} \quad \text{..... (B.5)}$$

式中:

α_y ——排出烟气中的空气过剩系数;

V_k ——实际空气量, m³。

B.4 干烟气量的计算

B.4.1 对于液体燃料:

$\alpha_y > 1$ 时:

$$V_g = (\alpha - 0.21)V_k^0 + 1.867 \times \frac{\varphi_{C^0}}{100} + 0.7 \times \frac{\varphi_{S^0}}{100} + 0.8 \times \frac{\varphi_{H^0}}{100} \quad \text{..... (B.6)}$$

式中:

V_g ——液体燃料的干烟气量, m³/kg。

$\alpha_y < 1$ 时:

$$V_g = V_y^0 - (1 - \alpha)V_k^0 \times \frac{79}{100} - \frac{22.4}{18} \times \left(\frac{\varphi_{w^0} + 9\varphi_{H^0}}{100} \right) \quad \text{..... (B.7)}$$

α_y 以实测为准,无法实测时按式(B.8)和式(B.9)计算:

完全燃烧时:

$$\alpha_y = \frac{21}{21 - 79\varphi_{O_2} / [100 - (\varphi_{RO_2} + \varphi_{O_2})]} \quad \text{..... (B.8)}$$

不完全燃烧时:

$$\alpha_y = \frac{21}{21 - 79 \times (\varphi_{O_2} - 0.5\varphi_{CO} - 0.5\varphi_{H_2} - 2\varphi_{CH_4}) / [100 - (\varphi_{RO_2} + \varphi_{O_2} + \varphi_{CO} + \varphi_{H_2} + \varphi_{CH_4})]} \quad \text{..... (B.9)}$$

式(B.8)和式(B.9)中:

φ_{O_2} 、 φ_{CO} 、 φ_{H_2} 、 φ_{CH_4} 、 φ_{RO_2} ——分别为各相应成分的容积分数, %;

B.4.2 对于气体燃料

$$V_g = V_y^0 + (\alpha - 1)V_k^0 - \left(\varphi_{H_2^0} + 2\varphi_{CH_4^0} + \frac{n}{2}\varphi_{C_mH_n^0} + \varphi_{H_2S^0} + \varphi_{H_2O^0} \right) \frac{1}{100} \quad \text{..... (B.10)}$$

式中:

V_g ——气体燃料的干烟气量, m³/m³。

α_y 以实测为准,无法实测时按下式计算:

$$\alpha_y = \frac{21}{21 - 79 \times (\varphi_{O_2} - 0.5\varphi_{CO} - 0.5\varphi_{H_2} - 2\varphi_{CH_4}) / [100 - (\varphi_{RO_2} + \varphi_{O_2} + \varphi_{CO} + \varphi_{CH_4}) - \varphi_{N_2^g}]} \quad \dots\dots\dots (B.11)$$

式中:

$\varphi_{N_2^g}$ ——气体燃料中以干成分表示的氮气容积分数, %。

B.5 烟气中水蒸气量的计算

B.5.1 对于液体燃料

$$s_s = 1.293 \times V_k \times X + \frac{w_w + 9w_H}{100} \quad \dots\dots\dots (B.12)$$

式中:

s_s ——液体燃料燃烧产生的水蒸气量, kg/kg;

对于重油:

$$s_s = 1.293 \times V_k \times X + \frac{w_w + 9w_H}{100} + \frac{m_s}{m_s} \quad \dots\dots\dots (B.13)$$

式中:

1.293——标准状态下空气的容重;

X ——空气的湿含量, kg 水汽/kg 干空气, 见式(B.14);

w_w ——燃料中水的质量分数, %;

w_H ——燃料中氢的质量分数, %。

$$X = 0.622 \times \frac{\xi p_s}{p - \xi p_s} \text{ kg 水汽 / kg 干空气 } \quad \dots\dots\dots (B.14)$$

式中:

ξ ——空气的相对湿度;

p_s ——同温同压下饱和水蒸气分压, kPa, 参见附录 A 表 A.3;

p ——当地的大气压强, kPa。

B.5.2 对于气体燃料

$$s_s = 1.293 \times V_k \times X + \frac{18}{22.4} \times \left(\varphi_{H_2} + 2\varphi_{CH_4} + \frac{n}{2}\varphi_{C_mH_n} + \varphi_{H_2S} + \varphi_{H_2O} \right) \times \frac{1}{100} \quad \dots\dots\dots (B.15)$$

式中:

s_s ——气体燃料燃烧产生的水蒸气量, kg/m³;

$\varphi_{C_mH_n}$ 、 φ_{H_2S} 、 φ_{H_2O} ——分别表示燃料中各相应组分的体积分数, %。

附录 C

(资料性附录)

测定气体流量时测点的选择与计算方法

C.1 测点的选择

C.1.1 圆形截面的管道

圆形管道中流量的测量方法采用等面积同心圆环方法,即将内径为 D 的圆管分成若干个面积相等的同心圆环,如图 C.1 所示。再把每个圆环用同心圆等分为二,然后在等分圆与两根互相垂直的中心线的交点(每个圆上有四点)上测流速取平均值。

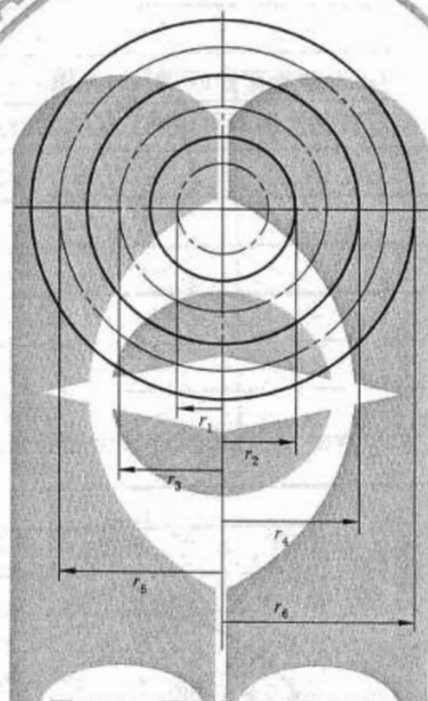


图 C.1 圆形截面测点分布图

从管中心到各测点的距离可用式(C.1)计算:

$$r_{2n-1} = \frac{D}{2} \cdot \sqrt{\frac{2n-1}{2N}} \quad \text{..... (C.1)}$$

式中:

D ——管道内径,mm;

n ——从管道中心算起的等面积同心圆环的序号;

N ——等面积圆环数;

r ——测定点到管中心的距离,mm。

等面积圆环数与管道直径有关,一般可按表 C.1 确定。

表 C.1 圆环数与测点数的选择

管道内径 D /mm	300	400	600	800	1 000	1 200	1 400	1 600	1 800
等面积圆环数 N	3	4	5	6	7	8	9	10	11
测点总数	6	8	20	24	28	32	36	40	44

式中:

V_0 ——标准状态下气体的平均流量, m^3/h ;

D ——管道内径, m ;

p_1 ——管道内流体静压, kPa 。