

**QB**

# 中华人民共和国行业标准

QB/T 2126~2131—95

---

## 日用陶瓷窑、炉、器 热能测定与计算方法

1995—06—07发布

1996—03—01实施

---

中国轻工总会 发布

## 日用陶瓷工业间歇式窑炉 热平衡、热效率测定与计算方法

### 1 主题内容与适用范围

本标准规定了日用陶瓷工业间歇式窑炉热平衡、热效率的测定与计算方法。

本标准适用于日用陶瓷产品生产中，使用液体、固体和气体燃料的间歇式窑炉热平衡、热效率的测定与计算。对于生产其他类型陶瓷产品的间歇式窑炉其热平衡、热效率的测定与计算可参照采用本标准。也可根据窑炉的具体现状增删测定项目。

### 2 引用标准

QB/T 1493 日用陶瓷火焰隧道窑热平衡、热效率测定与计算方法

GB 211 煤中全水分的测定方法

GB 212 煤的工业分析方法

GB 384 石油产品热值测定法

### 3 单位、符号与基准

#### 3.1 单位

本标准采用国家法定计量单位(SI)。

卡与焦耳的换算，本标准规定采用20℃卡，即： $1\text{cal} = 4.1816\text{J}$

毫米水柱与帕斯卡的换算为， $1\text{mmH}_2\text{O} = 9.8066\text{Pa}$

注：为便于与现行工程单位制对照，在〔 〕中附上工程单位制数值及其单位。

#### 3.2 符号

见附录A(补充件)。

#### 3.3 基准

温度基准： $0^\circ\text{C}$ ，即 $T_0 = 273.15\text{K}$ 。

物料基准： $1\text{kg}$ (产品)。

### 4 测定项目及测定方法

#### 4.1 测定前的准备

4.1.1 组织测定人员学习有关测定技术及安全规定，了解测定意义，熟悉仪表性能，掌握测定方法。

4.1.2 根据表1制定的测定方案，做好测定人员的岗位分工和测定要求。

4.1.3 参照附录C(参考件)准备好测定用仪表，进行必要的校正，使之达到规定的精度。

4.1.4 了解所测窑炉的设计、生产及维修史，并按附录B（补充件）表B1填写窑炉基本情况。

4.1.5 布置测量点，开设测量孔，安装测量仪表，进行单项检测。

#### 4.2 热平衡方框图

4.2.1 在作热平衡计算时，为防止将热收入和热支出的项目遗漏，常用一个方框图把窑炉的所有热收入和热支出项目逐项示出，见图1。

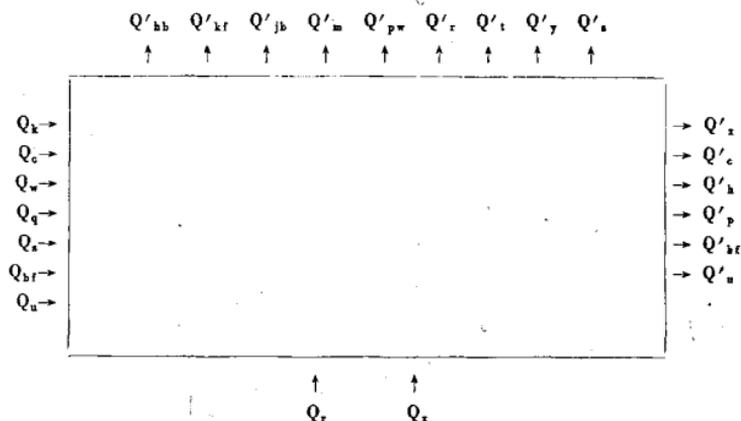


图1 热平衡方框图

4.2.2 本标准对日用陶瓷工业间歇式窑炉体系划分，窑体以外表面为界，风、油、气、汽管道以离窑最近测点为界。窑底部（包括窑底部烟道）以地平面为界。界线以外（如干燥器等）均不在体系内。

#### 4.3 测定时间

4.3.1 总连续测定时间不少于一个烧成周期。

注：烧成周期是指坯体从进入窑内到烧成为产品而停止供给燃料的时间。

#### 4.4 测量步骤

4.4.1 测定项目及测定方法按表1进行。

#### 4.5 测定结果的计算及分析

4.5.1 测定完毕对原始数据进行系统的整理。

4.5.2 按照第5、6、7章内容进行物料平衡、热平衡及热效率的计算。

4.5.3 对有怀疑的数据和漏测的项目，应进行补测和计算。

4.5.4 对计算最终结果进行分析研究，并指出问题所在，提出改进意见。

#### 4.6 记录及报告

4.6.1 绘出测点布置图，参照附录C（参考件）的格式写明测定用仪器的型号及精度。

4.6.2 窑炉的基本情况按附录B（补充件）表B1逐项填写。

4.6.3 实测数据综合表按附录B（补充件）表B2逐项填写。

表1 测定项目及测定方法

测定项目	参 数	测 定 时 间	测 点 选 择	测 定 方 法
温	1.燃料入窑温度 $t_r$ , °C	对油、气燃料为全周期记录;对煤2h测量一次	燃油或燃气应在入窑前管路上测定;燃煤应在各火箱前的各煤堆进行测定	使用热电阻温度计或水银温度计测量,取平均值
	2.周围空气的温度 $t_o$ , °C	每隔1h测量一次	于空气流通且不受窑温影响的地方	使用热电阻温度计或水银温度计测量,取平均值
	3.助燃空气入窑温度 $t_k$ , °C		机械送风助燃在入窑前管道上,自然送风助燃于炉前空气流通处	
	4.雾化空气入窑温度 $t_{kw}$ , °C		烧嘴前雾化空气管道截面中心取点	
	5.雾化蒸汽入窑温度 $t_{wq}$ , °C		烧嘴前雾化蒸汽管道截面中心取点	
	6.离窑烟气温 度 $t'_{yi}$ , °C		离窑烟道0.5m处截面中心取点	
度	7.坯体入窑温度 $t_s$ , °C	点火前	窑车最上层和中部边角处或窑内柱体取样	使用热电阻温度计、表面温度计或点温度计测定,取平均值
	8.匣钵入窑温度 $t_b$ , °C	点火前	窑车前、后、左、右及中部柱体,或窑内柱体取点	使用热电阻温度计、表面温度计或点温度计测定钵内外温度,取平均值
	9.辅助材料入窑温度 $t_l$ , °C			
	10.点火前窑顶内表面温度 $t_d$ , °C	点火前	窑顶内表面选有代表性若干个点	使用热电阻温度计、表面温度计或点温度计测定窑顶或窑墙内表面温度,取平均值
	11.点火前窑墙内表面温度 $t_q$ , °C	点火前	窑墙内表面选有代表性若干个点	
	12.产品最高烧成温度 $t'_g$ , °C	高温保温阶段	在窑内选三个代表性位置	使用标准SK三角测温锥,选择合适锥号每组三个,按标准插入泥座测量,取平均值
	13.高温保温阶段窑顶内表面温度 $t'_d$ , °C			
	14.高温保温阶段窑墙内表面温度 $t'_q$ , °C			

续表 1

测定项目	参 数	测 定 时 间	测 点 选 择	测 定 方 法
温	15.烧成中第 <i>i</i> 阶段灰渣平均温度 $t'_{i1}$ , °C	于灰渣离开炉棚前, 全周期测定	在每只炉炉棚灰渣层深度中部处	使用镍铬—镍硅热电偶和电子电位差计测定, 取平均值
	16.烧成中第 <i>i</i> 阶段窑车下部温度 $t'_{ji}$ , °C	点火前和每隔1h测一次	窑车金属部分测前、后及轮三点	使用表面温度计或点温度计测量, 取其平均温度作为各个阶段的平均温度
	17.烧成中第 <i>i</i> 阶段窑顶表面平均温度 $t'_{dm}$ , °C		窑顶选定左、中、右窑墙选定上、中、下若干个测点	
	18.烧成中第 <i>i</i> 阶段窑墙表面平均温度 $t'_{qm}$ , °C			
度	19.窑车各层耐火材料温度 $t_{ei}$ , °C	点火前和高温保温阶段	各层耐火材料中部	预先定点埋设热电偶并配电子电位差计分别测定各层平均温度
	20.窑顶各层耐火材料温度 $t_{di}$ , °C			
	21.窑墙各层耐火材料温度 $t_{qi}$ , °C			
	22.炉膛内的温度 $t'_{i1}$ , °C	每隔1h测量一次	炉口及各个孔洞处	用铂铑—铂热电偶和电子电位差计测定
	23.重油乳化水温度 $t_w$ , °C	每隔1h测量一次	在乳化装置前管道上	用水银温度计或表面温度计测定
	1.窑顶表面平均热流密度, $q_{di}$ , W/m <sup>2</sup>		分3~5段, 窑顶左、中、右选点, 窑墙上、中、下选点	用接触式热流计、非接触式热流计测得各点的热流密度; 或用点温度计、表面温度计测定并计算, 取平均值
	2.窑墙表面平均热流密度, $q_{qi}$ , W/m <sup>2</sup>			
3.窑体表面积 $A_i$ , m <sup>2</sup>	测定前	整个窑体表面		

续表 1

测定项目	参 数	测 定 时 间	测 点 选 择	测 定 方 法	
气	助燃空气	1.测点处管道截面积 $A_k$ , $m^2$	测定前	风管直管部位( $>3D$ )处选面	钢卷尺测量后计算
		2.动压 $p_k$ , Pa	每隔1h测量一次	在所测量截面处	按QB/T 1493附录G确定测点数,用毕托管和补偿式微压计或倾斜式压力计测定
		3.流速 $\omega_k$ , m/s			
流	雾化空气	4.测点处管道截面积 $A_w$ , $m^2$	测定前	风管直管部位( $>3D$ )处选面	钢卷尺测量后计算
		5.动压 $p_w$ , Pa	每隔1h测量一次	在所测量截面处	按QB/T 1493附录G确定测点数,用毕托管和补偿式微压计或倾斜式压力计测定
		6.流速 $\omega_w$ , m/s			
气	蒸汽	7.雾化蒸汽流量 $V_q$ , $m^3/s$	全测定周期	烧嘴前蒸汽主管道处选面	使用蒸汽流量计测定
		8.测点处管道截面积 $A_y$ , $m^2$	测定前	离窑烟道直管部位( $>3D$ )处选面	钢卷尺量测后计算
			9.动压 $p_y$ , Pa	每隔1h测量一次	在所测截面处
10.流速 $\omega_{yi}$ , m/s	高温风速计测定				
量	质	1.燃料的消耗量 $m_{fi}$ , kg/kg产品	全测定周期	油、气燃料在入窑前管路上测定,煤在各火箱前煤堆测量	油、气用流量表测量,煤于炉前称量
		2.窑车金属质量 $m_j$ , kg/kg产品	测定前	选择有代表性窑车	用校正过的磅秤实际称量金属件及衬砖的质量
		3.窑车(窑底)耐火衬砖质量 $m_{ci}$ , kg/kg产品			

续表 1

测定项目	参 数	测 定 时 间	测 点 选 择	测 定 方 法
质	4.窑顶耐火保温材料质量 $m_{di}$ , kg/kg产品	测定前	窑体	按图纸计算或实测计算
	5.窑墙耐火保温材料质量 $m_{qi}$ , kg/kg产品			
	6.坯体入窑质量 $m_s$ , kg/kg产品	入窑前	坯体入窑处	记录各个窑车的坯体数、单重及其类型后计算
	7.出窑产品质量 $m'_p$ , kg	出窑时	出窑处	称量总量或随机抽取各类产品或匣钵10件,称量后计算总量
	8.匣钵质量 $m_b$ , kg/kg产品	入窑前	入窑处	
	9.辅助材料的质量 $m_l$ , kg/kg产品			实际称量各个窑车上的装入量或窑内用量
	量	10.烧成中第i阶段灰渣质量 $m'_{zi}$ , kg/kg产品	在保持各个炉膛灰渣厚度一致的条件下全测定周期	在各火箱的灰坑
11.重油乳化水质量 $m_w$ , kg/kg产品		全测定周期	在重油掺水装置前管道上	测量全周期用量,取平均值,一般用转子流量计测定
气体分析	1.燃烧产物组成, %	每隔1h测量一次	窑内中部上、中、下选点	取样后用气体分析仪现场测定并分析记录,取平均值
	2.烟气组成, %		离窑烟道0.5m断面中部取样	
其他	1.燃料的低位发热量 $Q_{dw}$ , kJ/kg燃料(kJ/m <sup>3</sup> 燃料)	在测定周期内择时进行取样	对油、气燃料应在入窑前管道中利用旁通管路取样,对煤应在火箱附近的煤堆取样	燃料的低位发热量可用专门的热量计测定,也可以根据燃料的组成计算。气体燃料用奥氏气体分析仪作煤气全分析后计算;煤作元素分析或工业分析后计算,详见QB/T 1493附录C

续表 1

测定项目	参 数	测 定 时 间	测 点 选 择	测 定 方 法
其	2.坯体入窑平均含水率 $W_s$ , %	点火前	窑车中层边角处或窑内柱体内取样	取测温的坯体置于已知恒重的称量瓶中,用感量为0.001g的天平称量,求出坯体的质量 $m_1$ ,再在烘箱中于105℃烘干至恒重称得干坯体质量 $m_2$ ,则 $(m_1 - m_2)/m_1 \times 100\%$ 即为含水率。
	3.坯体的化学组成, %	测定前		取做完全含水率的样品进行化学分析
他	4.煤中灰分分数 $W_k$ , %	每隔2h测量一次	火箱前煤堆取样	见GB 211和GB 212
	5.燃料含水率 $W_f$ , %		在离窑前的灰渣中取样	
	6.灰渣中的含碳率 $W_t$ , %	测定周期择时测定		
	7.重油中乳化水分 $W_w$ , %			

注:  $D$  为测量管道直径。

## 5 物料平衡计算方法

### 5.1 物料平衡图见图2。

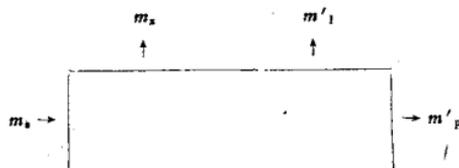


图2 物料平衡图

### 5.2 收入项

5.2.1 坯体入窑质量 $m_s$ , kg/kg产品

### 5.3 支出项

5.3.1 出窑产品质量 $m'_p$ , 按1kg计

5.3.2 坯体中自由水质量 $m_s$ , kg/kg产品

$$m_s = m_s \cdot W_s \dots \dots \dots (1)$$

式中： $W_s$ ——坯体入窑的平均相对含水率，%。

### 5.3.3 干坯体烧失减量 $m'_1$ ，kg/kg产品

$$m'_1 = m_g - m'_p \quad \dots \dots \dots (2)$$

式中： $m_g$ ——干坯体入窑质量，kg/kg产品。

$$m_g = m_s (1 - W_s)$$

## 5.4 物料平衡

$$m_s = m'_p + m_z + m'_1 \quad \dots \dots \dots (3)$$

## 6 热平衡计算方法

### 6.1 热收入

#### 6.1.1 燃料燃烧的化学热 $Q_r$ ，kJ/kg产品

$$Q_r = m_r \cdot Q_{Dw} \quad \dots \dots \dots (4)$$

式中： $m_r$ ——烧成中燃料的消耗量，kg/kg产品或 $m^3$ /kg产品；

$Q_{Dw}$ ——燃料应用基时的低位发热量，kJ/kg燃料或kJ/ $m^3$ 燃料，见QB/T 1493附录C。

#### 6.1.2 燃料带入的显热 $Q_x$ ，kJ/kg产品

$$Q_x = m_r \cdot c_r \cdot t_r \quad \dots \dots \dots (5)$$

如燃料中含水分较高时， $Q_x = m_r \cdot t_r \cdot [(1 - W_r) \cdot c_r + 4.1816 W_r]$

式中： $t_r$ ——燃料入窑的温度， $^{\circ}C$ ；

$W_r$ ——燃料的含水率，%；

$c_r$ ——燃料的比热容，kJ/(kg $\cdot^{\circ}C$ )或kJ/( $m^3 \cdot ^{\circ}C$ )，煤的比热容见QB/T 1493附录E表E1。

重油燃料： $c_r = 1.74 + 0.0025 t_r$

气体燃料： $c_r = 0.01 \sum (X_i \cdot c_i)$

式中： $X_i$ ——在燃料或烟气中各气体体积分数，%；

$c_i$ ——各气体成分的平均比热容，kJ/( $m^3 \cdot ^{\circ}C$ )，见QB/T 1493附录E表E4。

#### 6.1.3 助燃空气带入的显热 $Q_k$ ，kJ/kg产品

$$Q_k = \sum Q_{ki} = \sum V_{ki} \cdot c_k \cdot t_k \quad \dots \dots \dots (6)$$

式中： $Q_{ki}$ ——烧成中第*i*阶段助燃空气带入的显热，kJ/kg产品；

$c_k$ ——助燃空气的比热容，kJ/( $m^3 \cdot ^{\circ}C$ )，见QB/T 1493附录E表E4；

$t_k$ ——助燃空气入窑的温度， $^{\circ}C$ ；

$V_{ki}$ ——烧成中第*i*阶段助燃空气量， $m^3$ /kg产品。

$$V_{ki} = \alpha_{si} \cdot m_{ri} \cdot V_k^{\circ}$$

式中： $\alpha_{si}$ ——烧成中第*i*阶段的平均空气过剩系数；

$m_{ri}$ ——烧成中第*i*阶段燃料消耗量，kJ/kg产品；

$V_k^{\circ}$ ——理论空气量， $m^3$ /kg燃料或 $m^3$ / $m^3$ 燃料，见QB/T 1493附录D。

烧油时如果雾化空气与助燃空气入窑温度不同时，应分开计算其流量与带入的显热。

$$Q_{kk} = \sum Q_{kki} = \sum (V_{ki} \cdot c_k \cdot t_k + V_{kw_i} \cdot c_{kw} \cdot t_{kw}) \quad \dots \dots \dots (7)$$

式中:  $Q_{kk}$ ——雾化空气和助燃空气带入的显热, kJ/kg产品;  
 $Q_{kki}$ ——烧成中第*i*阶段雾化空气和助燃空气带入的显热, kJ/kg产品;  
 $V_{kwi}$ ——烧成中第*i*阶段雾化空气量,  $m^3/kg$ 产品;  
 $c_{kw}$ ——雾化空气的比热容, kJ/( $m^3 \cdot ^\circ C$ ), 见QB/T 1493附录E表E4;  
 $t_{kw}$ ——雾化空气入窑的温度,  $^\circ C$ 。

#### 6.1.4 雾化蒸汽带入的显热 $Q_{qi}$ , kJ/kg产品

$$Q_{qi} = \Sigma Q_{qi} = \Sigma 1.93 m_{wq} \cdot t_{wq} \dots \dots \dots (8)$$

式中:  $Q_{qi}$ ——烧成中第*i*阶段雾化蒸汽带入的显热, kJ/kg产品;  
 1.93——雾化蒸汽在0~250 $^\circ C$ 之间的平均比热容, kJ/( $kg \cdot ^\circ C$ );  
 $m_{wq}$ ——烧成中第*i*阶段雾化蒸汽质量, kg/kg产品。(蒸汽体积与质量的换算见QB/T 1493);  
 $t_{wq}$ ——雾化蒸汽入窑的温度,  $^\circ C$ 。

#### 6.1.5 重油乳化用水带入显热 $Q_w$ , kJ/kg产品

$$Q_w = 4.1816 \Sigma m_{wi} \cdot t_w \dots \dots \dots (9)$$

式中, 4.1816——水的比热容, kJ/( $kg \cdot ^\circ C$ );  
 $t_w$ ——重油乳化用水温度,  $^\circ C$ ;  
 $m_{wi}$ ——烧成中第*i*阶段重油乳化用水质量, kg/kg产品;  
 $m_{wi} = m_{ri} \cdot W_w$

式中:  $W_w$ ——重油中乳化水分, %。

#### 6.1.6 坯体带入的显热 $Q_s$ , kJ/kg产品

$$Q_s = Q_g + Q_x = m_s \cdot (1 - W_s) \cdot c_g \cdot t_s + 4.1816 m_s \cdot W_s \cdot t_s \dots \dots \dots (10)$$

式中:  $Q_g$ ——干坯体带入的显热, kJ/kg产品;  
 $Q_x$ ——坯体中自由水分带入的显热, kJ/kg产品;  
 $c_g$ ——干坯体的平均比热容, kJ/( $kg \cdot ^\circ C$ ), 见QB/T 1493附录E表E3;  
 $t_s$ ——坯体入窑的温度,  $^\circ C$ 。

#### 6.1.7 窑车带入的显热 $Q_c$ , kJ/kg产品

$$Q_c = Q_j + Q_n = m_j \cdot c_j \cdot t_j + \Sigma m_{ci} \cdot c_{ci} \cdot t_{ci} \dots \dots \dots (11)$$

式中:  $Q_j$ ——窑车金属带入的显热, kJ/kg产品;  
 $Q_n$ ——窑车耐火衬砖带入的显热, kJ/kg产品;  
 $m_j$ 、 $m_{ci}$ ——分别表示窑车金属和第*i*层耐火衬砖质量, kJ/kg产品;  
 $c_j$ ——窑车金属的比热容, 取0.5kJ/( $kg \cdot ^\circ C$ );  
 $c_{ci}$ ——点火前窑车第*i*层耐火衬砖入窑时比热容, kJ/( $kg \cdot ^\circ C$ ), 见QB/T 1493附录E表E3;  
 $t_j$ 、 $t_{ci}$ ——分别表示点火前窑车金属和第*i*层耐火衬砖入窑时温度,  $^\circ C$ 。

#### 6.1.8 窑具材料带入的显热 $Q_{bf}$ , kJ/kg产品

$$Q_{bf} = Q_b + Q_f \\ = m_b \cdot c_b \cdot t_b + m_f \cdot c_f \cdot t_f \dots \dots \dots (12)$$

式中:  $Q_b$ ——匣钵带入的显热, kJ/kg产品;

$Q_f$ ——辅助材料带入的显热, kJ/kg产品;

$m_b$ 、 $m_f$ ——分别表示匣钵和辅助材料质量, kg/kg产品;

$c_b$ 、 $c_f$ ——分别表示匣钵和辅助材料入窑时比热容, kJ/(kg·°C), 见QB/T 1493附录E表E3;

$t_b$ 、 $t_f$ ——分别表示匣钵及辅助材料入窑温度, °C。

### 6.1.9 升温前窑体蓄热量 $Q_u$ , kJ/kg产品

$$Q_u = \Sigma [m_{di} \cdot c_{di} \cdot t_{di} + m_{qi} \cdot c_{qi} \cdot t_{qi} + m_{ci} \cdot c_{ci} \cdot t_{ci}] \dots \dots \dots (13)$$

式中,  $m_{di}$ 、 $m_{qi}$ 、 $m_{ci}$ ——分别表示窑顶、窑墙和窑底第*i*层耐火材料质量, kg/kg产品;

$c_{di}$ 、 $c_{qi}$ 、 $c_{ci}$ ——分别表示点火前窑顶、窑墙和窑底第*i*层耐火材料平均比热容, kJ/(kg·°C);

$t_{di}$ 、 $t_{qi}$ 、 $t_{ci}$ ——分别表示点火前窑顶、窑墙和窑底第*i*层耐火材料平均温度, °C。

### 6.1.10 总热收入 $Q$ , kJ/kg产品

$$Q = Q_f + Q_x + Q_k \text{ (或 } Q_{kk}) + Q_c + Q_w + Q_u + Q_n + Q_c + Q_{bf} \dots \dots \dots (14)$$

## 6.2 热支出

### 6.2.1 坯体加热到最高烧成温度时所需热量 $Q'_p$ , kJ/kg产品

$$Q'_p = m'_p \cdot c'_p \cdot t'_g \dots \dots \dots (15)$$

式中,  $c'_p$ ——最高烧成温度时产品的平均比热容, kJ/(kg·°C), 见QB/T 1493附录E表E3;

$t'_g$ ——最高烧成温度, °C。

### 6.2.2 坯体水分蒸发和加热水蒸气到离窑烟气温度时耗热 $Q'_{pw}$ , kJ/kg产品

$$Q'_{pw} = Q'_z + Q'_{jw} = m_z \cdot (2490 + 1.93t'_{yi}) + 6700m_o \dots \dots \dots (16)$$

式中:  $Q'_z$ ——坯体中自由水分蒸发并加热到离窑烟气温度时耗热, kJ/kg产品;

$Q'_{jw}$ ——坯体中结构水脱水耗热, kJ/kg产品;

$t'_{yi}$ ——烧成中第*i*阶段离窑烟气的温度, °C;

2490——在0°C时, 每千克自由水蒸发所需热量, kJ/kg;

6700——每千克结构水脱水所需热量, kJ/kg;

$m_o$ ——干坯体的结构水质量, kg/kg产品。

$$m_o = m'_1 - m_g \left( W_m \frac{44}{40} + W_c \frac{44}{56} \right)$$

$W_m$ 、 $W_c$ ——分别表示干坯体中氧化镁、氧化钙的质量分数, %。

由于空气中带有的水分其量很小, 这部分水分加热时的耗热量可忽略不计。

### 6.2.3 坯体烧成过程物理化学反应耗热 $Q'_n$ , kJ/kg产品

$$Q'_n = m_g \cdot (2100W_a + 2823W_c + 2747W_m) \dots \dots \dots (17)$$

式中: 2100、2823、2747——分别为每千克氧化铝、氧化钙、氧化镁的分解热, kJ/kg;

$W_a$ ——干坯体中氧化铝的质量分数, %。

### 6.2.4 坯体烧成过程生成玻璃相耗热 $Q'_x$ , kJ/kg产品

$$Q'_x = 347W_x \cdot m'_p \dots \dots \dots (18)$$

式中: 347——产品中生成每千克玻璃相耗热, kJ/kg;

$W_x$ ——产品中玻璃相的质量分数（包括产品中釉面的质量分数），%。

### 6.2.5 窑车（或窑底）加热到最高烧成温度时的蓄热 $Q'_c$ ，kJ/kg产品

$$Q'_c = Q'_j + Q'_n = m_j \cdot c_j \cdot t'_j + \sum (m_{ci} \cdot c'_{ci} \cdot t'_{ci}) \dots \dots \dots (19)$$

式中： $Q'_j$ 、 $Q'_n$ ——分别表示窑车金属和耐火衬砖蓄热，kJ/kg产品；

$c'_{ci}$ ——窑车第*i*层耐火衬砖平均比热容，kJ/(kg·°C)，见QB/T 1493附录E表E3；

$t'_j$ 、 $t'_{ci}$ ——分别表示最高烧成温度时窑车金属和第*i*层耐火衬砖的平均温度，°C。

### 6.2.6 窑具材料加热到最高烧成温度时所需热量 $Q'_{bf}$ ，kJ/kg产品

$$Q'_{bf} = Q'_b + Q'_f = m_b \cdot c'_b \cdot t'_g + m_f \cdot c'_f \cdot t'_g \dots \dots \dots (20)$$

式中： $Q'_b$ ——匣钵加热到最高温度时所需热量，kJ/kg产品；

$Q'_f$ ——辅助材料加热到最高烧成温度时所需热量，kJ/kg产品；

$c'_b$ 、 $c'_f$ ——分别表示匣钵及辅助材料最高烧成温度时的比热容，kJ/(kg·°C)，见QB/T 1493附录E表E3。

### 6.2.7 干烟气带走的显热 $Q'_y$ ，kJ/kg产品

$$Q'_y = \sum Q_{yi} = \sum m_{ri} \cdot V'_{y1} \cdot c_{yi} \cdot t_{y1} \dots \dots \dots (21)$$

式中： $Q_{yi}$ ——烧成中第*i*阶段干烟气带走的显热，kJ/kg产品；

$c_{yi}$ ——烧成中第*i*阶段干烟气的比热容，kJ/(m<sup>3</sup>·°C)；

$$c_{yi} = 0.01 \sum (x_i \cdot c_i)$$

$V'_{y1}$ ——烧成中第*i*阶段离窑干烟气量，m<sup>3</sup>/kg燃料或m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>燃料。

注： $V'_{y1}$ 值的计算方法见QB/T 1493附录D中D3。

### 6.2.8 烟气中水蒸气（包括燃料燃烧生成水、乳化用水、雾化蒸汽加热到离窑烟气温度时）带出显热 $Q'_{a1}$ ，kJ/kg产品

$$Q'_{a1} = \sum Q_{ai} = \sum [(m_{ai} + m_{wi}) (2490 + 1.93t'_{y1}) + 1.93m_{qt} \cdot t'_{y1}] \dots \dots \dots (22)$$

式中： $Q_{ai}$ ——烧成中第*i*阶段烟气中水蒸气带出显热，kJ/kg产品；

$m_{ai}$ ——烧成中第*i*阶段燃料燃烧生成水质量，kg/kg产品。

$$m_{ai} = m \cdot m_{ri}$$

注： $m$ 的计算见QB/T 1493附录D中D2。

### 6.2.9 烧成温度下窑体蓄热量 $Q_u$ ，kJ/kg产品

$$Q_u = \sum [m_{di} \cdot c'_{di} \cdot t'_{di} + m_{qi} \cdot c'_{qi} \cdot t'_{qi} + m_{ci} \cdot c'_{ci} \cdot t'_{ci}] \dots \dots \dots (23)$$

式中： $c'_{di}$ 、 $c'_{qi}$ 、 $c'_{xi}$ ——分别表示烧成温度下窑顶、窑墙和窑底（窑车）第*i*层耐火材料（窑车金属）平均比热容，kJ/(kg·°C)；

$t'_{di}$ 、 $t'_{qi}$ 、 $t'_{xi}$ ——分别表示烧成温度下窑顶、窑墙和窑底（或窑车）第*i*层耐火材料中部（及窑车金属）温度，°C。

### 6.2.10 窑体表面散热损失 $Q'_m$ ，kJ/kg产品

#### 6.2.10.1 原则上采用热流计法，对窑墙、窑顶分段进行测量和计算。其计算公式为：

$$Q'_m = 3.6 \sum (q_i \cdot A_i) / m_h \dots \dots \dots (25)$$

式中： $q_i$ ——窑体中窑顶、窑墙和窑车底部的平均热流密度，W/m<sup>2</sup>；

$A_i$ ——窑体的表面积，m<sup>2</sup>，即窑顶、窑墙和窑车（或窑底部）面积之和；

$m_h$ ——产品小时质量, kg/h。

6.2.10.2 亦可采用传统公式计算窑体散热 $Q'_m$ , kJ/kg产品

$$Q'_m = Q_{qm} + Q_{dm} + Q_{cm} \dots \dots \dots (26)$$

式中:  $Q_{qm}$ 、 $Q_{dm}$ 、 $Q_{cm}$ ——分别表示窑墙、窑顶、窑车表面的散热损失, kJ/kg产品。

$$Q_{qm} = [\sum \alpha_{qi} \cdot (t_{qm} - t_o) \cdot A_q] / m_h$$

$$Q_{dm} = [\sum \alpha_{di} \cdot (t_{dm} - t_o) \cdot A_d] / m_h$$

$$Q_{cm} = [\sum \alpha_{ci} \cdot (t_{cm} - t_o) \cdot A_c] / m_h$$

式中:  $t_{qm}$ 、 $t_{dm}$ 、 $t_{cm}$ ——分别表示烧成中第  $i$  阶段窑墙、窑顶和窑车(或窑底部)表面平均温度;  $^{\circ}\text{C}$ ;

$t_o$ ——周围空气的温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$A_q$ 、 $A_d$ 、 $A_c$ ——分别表示窑墙、窑顶和窑车表面积,  $\text{m}^2$ 。

$$t_{qm} = \frac{\left(\frac{t_{qs} + t_x}{2}\right) + \left(\frac{t_{qs} + t_{qx}}{2}\right)}{2}$$

$$t_{dm} = \frac{\left(\frac{t_{du} + t_{ds}}{2}\right) + \left(\frac{t_{ds} + t_{dy}}{2}\right)}{2}$$

式中:  $t_{qs}$ 、 $t_{qx}$ 、 $t_{qx}$ ——分别表示窑墙上部、中部、下部测点的温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$t_{du}$ 、 $t_{ds}$ 、 $t_{dy}$ ——分别表示窑顶左侧、中间、右侧测点的温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$\alpha_{di}$ 、 $\alpha_{qi}$ 、 $\alpha_{ci}$ ——分别表示烧成中第  $i$  阶段测得的窑顶、窑墙和窑车(或窑底部)对空气的综合传热系数,  $\text{kJ}/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^{\circ}\text{C})$ 。

$$\alpha_{qi} = 9.20 \sqrt{\frac{1}{(t'_{qm} - t_o)}} + \frac{20.40 \varepsilon \left[ \left( \frac{t_{qm} + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{t_o + 273}{100} \right)^4 \right]}{t_{qm} - t_o}$$

$$\alpha_{di} = 11.70 \sqrt{\frac{1}{(t_{dm} - t_o)}} + \frac{20.40 \varepsilon \left[ \left( \frac{t_{dm} + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{t_o + 273}{100} \right)^4 \right]}{t_{dm} - t_o}$$

$$\alpha_{ci} = 11.70 \sqrt{\frac{1}{(t_{cm} - t_o)}} + \frac{20.40 \varepsilon \left[ \left( \frac{t_{cm} + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{t_o + 273}{100} \right)^4 \right]}{t_{cm} - t_o}$$

$\varepsilon$ ——窑体外表面的黑度(各种材料黑度见QB/T 1493附录E表E7)。

6.2.11 化学不完全燃烧热损失 $Q'_{hb}$ , kJ/kg产品

$$Q'_{hb} = \sum Q_{hbi} = \sum 12628 x_{coi} \cdot V'_{yi} \dots \dots \dots (28)$$

式中:  $Q_{hbi}$ ——烧成中第  $i$  阶段化学不完全燃烧热损失, kJ/kg产品;

12628——每立方米标米一氧化碳的反应热,  $\text{kJ}/\text{m}^3$ ;

$x_{coi}$ ——烧成中第  $i$  阶段干烟气中一氧化碳的体积分数, %。

6.2.12 机械不完全燃烧热损失 $Q'_{jb}$ , kJ/kg产品

$$Q'_{jb} = \sum Q_{jbi} = \sum 33871 (m'_{ri} - m_{ri}) W_h \dots \dots \dots (29)$$

式中： $Q_{jbi}$ ——烧成中第  $i$  阶段机械不完全燃烧热损失，kJ/kg 产品；

33871——每千克碳的反应热，kJ/kg；

$W_h$ ——煤中灰分的质量分数，%；

$m'_{ri}$ ——烧成中第  $i$  阶段灰渣的平均质量，kg/kg 产品。实际称量或者采用下式计算：

$$m'_{ri} = \frac{m_{ri} \cdot W_h}{1 - W_t}$$

式中： $W_t$ ——灰渣中的含碳率，%。

6.2.13 灰渣带走的显热  $Q'_r$ ，kJ/kg 产品

$$Q'_r = \sum Q'_{ri} = \sum m'_{ri} \cdot c'_r \cdot t'_{ri} \dots \dots \dots (30)$$

式中： $c'_r$ ——灰渣的比热容，kJ/(kg·°C)，见 QB/T 1493 附录 E 表 E6；

$t'_{ri}$ ——烧成中第  $i$  阶段灰渣的平均温度，°C。

6.2.14 炉口及其孔洞的辐射热损失  $Q'_{kf}$ ，kJ/kg 产品

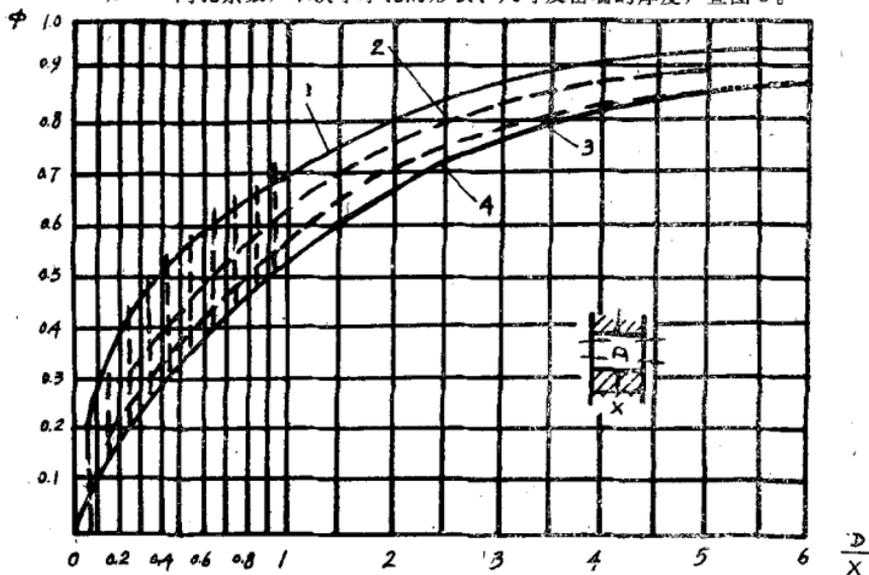
$$Q'_{kf} = C_0 \left[ \left( \frac{t'_{ti} + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{t_o + 273}{100} \right)^4 \right] \cdot A_o \cdot \phi / m_h \dots \dots \dots (32)$$

式中： $C_0$ ——黑体辐射系数，等于 20.4 kJ/(h·m·K<sup>4</sup>)；

$t'_{ti}$ ——烧成中第  $i$  阶段炉膛内的平均温度，°C；

$A_o$ ——孔口辐射面积，m<sup>2</sup>；

$\phi$ ——门孔系数，取决于小孔的形状、尺寸及窑墙的厚度，查图 3。



1—伸长的长方形；2—长方形(2:1)；3—正方形；4—圆形

图 3 门孔系数计算图

6.2.15 其它热损失  $Q'_t$ ，kJ/kg 产品

包括开启炉门和窑体各孔洞等处逸出气体热损失以及窑底部向地基的散热损失和氧化铁还原消耗燃料燃烧热等项目。

$$Q'_t = Q - (Q'_p + Q'_{pw} + Q'_h + Q'_x + Q'_c + Q'_{bf} + Q'_y + Q'_g + Q'_u + Q'_m + Q'_{hb} + Q'_{jb} + Q'_r + Q'_{kf}) \dots\dots\dots (34)$$

其它热损失不宜大于8%，否则应对测定与计算结果进行复核。

### 6.3 热平衡计算结果见表3。

表3 热平衡表

序号	热 收 入 Q		热 支 出 Q'	
	项 目	kJ/kg产品 %	项 目	kJ/kg产品 %
1	燃料燃烧的化学热 $Q_c$		坯体加热到最高温度所需热量 $Q'_p$	
2	燃料带入的显热 $Q_x$		坯体水分蒸发和加热水蒸气到离窑烟气温度时耗热 $Q'_{pw}$	
3	助燃空气带入的显热 $Q_k$		坯体烧成过程中物理化学反应耗热 $Q'_{bf}$	
4	雾化蒸汽带入的显热 $Q_q$		坯体烧成中生成玻璃相耗热 $Q'_g$	
5	重油乳化用水带入显热 $Q_w$		窑车加热到最高温度时蓄热 $Q'_c$	
6	坯体带入的显热 $Q_x$		窑具材料加热到最高温度时所需热量 $Q'_{bf}$	
7	窑车带入的显热 $Q_x$		干烟气带出的显热 $Q'_y$	
8	窑具材料带入的显热 $Q_{bf}$		烟气中水蒸气带出的显热 $Q'_g$	
9	升温前窑体蓄热量 $Q_s$		烧成温度下窑体的蓄热 $Q'_s$	
10			窑体表面散热损失 $Q'_m$	
11			化学不完全燃烧热损失 $Q'_{hb}$	
12			机械不完全燃烧热损失 $Q'_{jb}$	
13			灰渣带走的显热 $Q'_r$	
14			炉口及其孔洞辐射热损失 $Q'_{kf}$	
15			其他热损失 $Q'_t$	
16	合计		合计	

## 7 热效率计算方法

### 7.1 烧成产品的有效热 $Q_{py}$ , kJ/kg产品

$$Q_{py} = Q'_c + Q'_h + Q'_g + Q'_x \dots\dots\dots (35)$$

式中： $Q'_c$ ——坯体水分蒸发并加热到离窑烟气温度时净耗热，kJ/kg产品；

$$Q'_q = Q_{pw} - Q_x$$

$Q'_{pw}$ 计算方法见式(16)；

$Q_x$ 计算方法见式(10)；

$Q'_h$ 计算方法见式(17);

$Q'_g$ ——产品烧成至最高烧成温度时净耗热, kJ/kg产品;

$Q'_g = m'_p \cdot c'_p \cdot t'_g - Q_g$

$Q_g$ 计算方法见式(10);

$Q'_x$ 计算方法见式(18)。

### 7.2 含窑具材料在内的有效热 $Q_{xy}$ , kJ/kg产品

$$Q_{xy} = Q'_q + Q'_h + Q'_g + Q'_x + Q_{jg} \dots\dots\dots (36)$$

式中:  $Q_{jg}$ ——窑具材料加热到最高烧成温度时耗热, kJ/kg产品。

$$Q_{jg} = Q'_{br} - Q_{br}$$

式中:  $Q_{br}$ 计算方法见式(12);

$Q'_{br}$ 计算方法见式(20)。

### 7.3 供热给 $Q_{gj}$ , kJ/kg产品

$$Q_{gj} = Q_r \dots\dots\dots (37)$$

式中:  $Q_r$ 计算方法见式(4)。

### 7.4 烧成产品的窑炉热效率 $\eta_p$ , %

$$\eta_p = Q_{py} / Q_{gj} \times 100 \dots\dots\dots (38)$$

### 7.5 含窑具材料在内的窑炉热效率 $\eta_x$ , %

$$\eta_x = Q_{xy} / Q_{gj} \times 100 \dots\dots\dots (39)$$

注: 本标准供给能量系指由能源供给的能量, 不包括由工质或物料带入的能量, 以便于直接考察能源利用程度。

### 7.6 单位产品烧成能耗 $Q_d$ , kJ/kg

$$Q_d = Q_{gj} \dots\dots\dots (40)$$

### 7.7 窑炉热效率计算综合表见表4。

表4 窑炉热效率计算综合表

项	目	单 位	数 据
有 效 热	坯体水分蒸发并加热到离窑烟气温度时净耗热 $Q'_q$	kJ/kg产品	
	坯体烧成过程中物理化学反应耗热 $Q'_h$		
	坯体烧成过程生成玻璃相耗热 $Q'_x$		
	坯体烧成至最高烧成温度时的耗热 $Q'_g$		
	窑具材料加热到最高烧成温度时净耗热 $Q_{jg}$		
	燃料供给热 $Q_{gj}$		
热 效 率	烧成产品的窑炉热效率 $\eta_p$	%	
	含窑具材料在内的窑炉热效率 $\eta_x$		
	单位产品烧成能耗 $Q_d$		kJ/kg产品

附录 A  
符号及角标说明  
(补充件)

表 A 1

序号	符号	说 明	单 位
收 入 项			
1	$A_k$	助燃空气管道或入口截面积	$m^2$
2	$A_w$	雾化空气的管道截面积	
3	$c_b$	匣钵入窑时的比热容	$kJ/(kg \cdot ^\circ C)$
4	$c_{ci}$	点火前窑车或窑底第 $i$ 层耐火材料比热容	
5	$c_{di}$	点火前窑顶第 $i$ 层耐火材料比热容	
6	$c_f$	辅助材料入窑时的平均比热容	
7	$c_g$	干坯体的平均比热容	$kJ/(m^3 \cdot ^\circ C)$
8	$c_j$	窑车金属的比热容, 取0.5	
9	$c_k$	助燃空气的比热容	
10	$c_{kw}$	雾化空气的比热容	
11	$c_{qi}$	点火前窑墙第 $i$ 层耐火材料比热容	$kJ/(kg \cdot ^\circ C)$
12	$c_r$	燃料的比热容	$kJ/(kg \cdot ^\circ C)$ 或 $kJ/(m^3 \cdot ^\circ C)$
13	$m_b$	匣钵的质量	$kg/kg$ 产品
14	$m_{ci}$	窑车或窑底第 $i$ 层耐火材料质量	
15	$m_{di}$	窑顶第 $i$ 层耐火材料质量	
16	$m_f$	辅助材料的质量 (烧结制品)	
17	$m_g$	干坯体入窑质量	
18	$m_j$	窑车的金属质量	
19	$m_o$	坯体中结构水质量	
20	$m_{wg}$	烧成中第 $i$ 阶段雾化蒸汽质量	
21	$m_{qi}$	窑墙第 $i$ 层耐火材料质量	
22	$m_r$	燃料消耗量	
23	$m_{ri}$	烧成中第 $i$ 阶段燃料消耗量	
24	$m_s$	坯体入窑质量	

续表 A 1

序号	符号	说 明	单 位
收 入 项			
25	$m_w$	重油乳化水质量	kg/kg产品
26	$m_g$	坯体中自由水分质量	
27	$p_d$	大气压强	Pa
28	$p_k$	助燃空气管道或入口的动压	
29	$p_w$	雾化空气动压	
30	$Q$	总热收入	kJ/kg产品
31	$Q_b$	坯钵带入的显热	
32	$Q_{bf}$	窑具材料带入的显热	
33	$Q_c$	窑车带入的显热	
34	$Q'_{DW}$	燃料应用基时的低位发热量	kJ/kg燃料或kJ/m <sup>3</sup> 燃料
35	$Q_f$	辅助材料带入的显热	kJ/kg产品
36	$Q_g$	干坯体带入的显热	
37	$Q_{gj}$	供给热	
38	$Q_j$	窑车金属带入的显热	
39	$Q_k$	助燃空气带入的显热	
40	$Q_{ki}$	烧成中第 i 阶段助燃空气带入显热	
41	$Q_{kk}$	助燃空气和雾化空气带入显热	
42	$Q_{kki}$	烧成中第 i 阶段雾化空气和助燃空气带入显热	
43			
44	$Q_n$	窑车耐火衬砖带入的显热	
45	$Q_q$	雾化蒸汽带入显热	
46	$Q_{qi}$	烧成中第 i 阶段雾化蒸汽带入显热	
47	$Q_r$	燃料燃烧的化学热	
48	$Q_x$	燃料带入的显热	
49	$Q_s$	坯体带入的显热	
50	$Q_a$	升温前窑体蓄热量	
51	$Q_w$	重油乳化用水带入的显热	

续表 A 1

序 号	符 号	说 明	单 位	
收 入 项				
52	$Q_s$	坯体中自由水带入的显热	kJ/kg产品	
53	$t_b$	匣钵入窑温度		
54	$t_{ci}$	点火前窑车或窑底第 i 层耐火材料温度		
55	$t_d$	点火前窑顶内表面温度		
56	$t_{di}$	点火前窑顶第 i 层耐火材料温度		
57	$t_f$	辅助材料入窑的温度		
58	$t_j$	窑车金属入窑的温度		
59	$t_k$	助燃空气入窑的温度		
60	$t_{kw}$	雾化空气入窑的温度		
61	$t_o$	周围空气的温度		
62	$t_q$	点火前窑墙内表面温度		
63	$t_{qi}$	点火前窑墙第 i 层耐火材料温度		
64	$t_r$	燃料入窑的温度		
65	$t_s$	坯体入窑的温度		
66	$t_w$	重油乳化用水温度		
67	$t_{wq}$	雾化蒸汽入窑温度		
68	$V_k$	理论空气量		$m^3/kg$ 燃料或 $m^3/m^3$ 燃料
69	$V_{ki}$	烧成中第 i 阶段助燃空气量		$m^3/kg$ 产品
70	$V_{kwi}$	烧成中第 i 阶段雾化空气量		
71	$V_q$	雾化蒸汽量		%
72	$W_a$	干坯体中氧化铝的质量分数		
73	$W_o$	干坯体中氧化钙的质量分数		
74	$W_h$	煤中灰分的质量分数		
75	$W_m$	干坯体中氧化镁的质量分数		
76	$W_r$	燃料含水率		
77	$W_s$	坯体入窑相对平均含水率		
78	$W_w$	重油乳化水质量分数		

续表 A 1

序号	符号	说 明	单 位
收 入 项			
79	$\omega_k$	助燃空气流速	m/s
80	$\omega_w$	雾化空气流速	
支 出 项			
81	$A_c$	窑车或窑底表面积	$m^2$
82	$A_d$	窑顶表面积	
83	$A_i$	窑体表面积	
84	$A_o$	孔口辐射面积	
85	$A_q$	窑墙表面积	
86	$A_y$	烟道截面积	
87	$C_o$	黑体辐射系数, 等于20.4	$kJ/(h \cdot m \cdot K^4)$
88	$c'_b$	匣钵最高烧成温度时比热容	$kJ/(kg \cdot ^\circ C)$
89	$c'_{ei}$	最高温度时窑车或窑底第 i 层耐火材料比热容	
90	$c'_{di}$	高温时窑顶第 i 层耐火材料比热容	
91	$c'_f$	辅助材料最高烧成温度时比热容	
92	$c_i$	各气体成分的平均比热容	$kJ/(m^3 \cdot ^\circ C)$
93	$c'_p$	最高烧成温度时产品比热容	$kJ/(kg \cdot ^\circ C)$
94	$c'_{qi}$	高温时窑墙第 i 层耐火材料比热容	
95	$c'_r$	灰渣的比热容	
96	$c'_{yi}$	烧成中第 i 阶段干烟气比热容	$kJ/(m^3 \cdot ^\circ C)$
97	$m_b$	产品小时质量	kg/h
98	$m'_1$	干坯体烧失减量	kg/kg产品
99	$m'_p$	出窑产品质量, 按1kg计	kg
100	$m'_{ri}$	烧成中第 i 阶段灰渣质量	kg/kg产品
101	$m_{si}$	烧成中第 i 阶段燃料燃烧生成水质量	
102	$p_y$	烟气动压	Pa
103	$Q'$	总热支出	$kJ/kg产品$
104	$Q'_b$	匣钵加热到最高温度时需要热量	
105	$Q'_{kf}$	窑具材料加热到最高温度需要热量	

续表 A 1

序号	符号	说 明	单 位
支 出 项			
106	$Q'_c$	窑车加热到最高温度时蓄热	kJ/kg产品
107	$Q_{em}$	窑车或窑底散热损失	
108	$Q_{dm}$	窑顶表面散热损失	
109	$Q'_f$	辅助材料加热到最高温度时需要热量	
110	$Q'_h$	坯体烧成过程物理化学反应耗热	
111	$Q'_{hb}$	化学不完全燃烧热损失	
112	$Q'_{hbi}$	烧成中第 i 阶段化学不完全燃烧热损失	
113	$Q'_j$	窑车金属加热到最高温度时蓄热	
114	$Q'_{jb}$	机械不完全燃烧热损失	
115	$Q_{jbi}$	烧成中第 i 阶段机械不完全燃烧热损失	
116	$Q'_{jw}$	坯体中结构水脱水耗热	
117	$Q'_{kf}$	炉口及其孔洞的辐射热损失	
118	$Q'_m$	窑体表面散热损失	
119	$Q'_n$	最高温度时窑车耐火材料蓄热	
120	$Q'_p$	坯体加热到最高温度时需要热量	
121	$Q'_{pw}$	坯体水分蒸发和加热水蒸气耗热	
122	$Q_{qm}$	窑墙表面散热损失	
123	$Q'_r$	灰渣带走的显热	
124	$Q'_{ri}$	烧成中第 i 阶段灰渣带出显热	
125	$Q'_s$	烟气中水蒸气带出的显热	
126	$Q'_{si}$	烧成中第 i 阶段烟气中水蒸气带出显热	
127	$Q'_t$	其它热损失	
128	$Q'_u$	最高烧成温度时窑体蓄热	
129	$Q'_x$	坯体烧成过程中生成玻璃相耗热	
130	$Q'_y$	干烟气带走的显热	
131	$Q_{yi}$	烧成中第 i 阶段干烟气带出显热	
132	$Q'_z$	坯体中自由水分蒸发耗热	

续表 A 1

序号	符号	说 明	单 位	
		支 出 项		
133	$q_{di}$	烧成中第 $i$ 阶段窑顶平均热流密度	$W/m^2$	
134	$q_i$	窑体平均热流密度		
135	$q_{qi}$	烧成中第 $i$ 阶段窑墙平均热流密度		
136	$t'_{oi}$	最高温度时窑车或窑底第 $i$ 层耐火材料温度		
137	$t_{cm}$	烧成中第 $i$ 阶段窑车下部表面温度		
138	$t_d$	最高温度时窑顶内表面温度		
139	$t'_{di}$	最高温度时窑顶第 $i$ 层耐火材料温度		
140	$t_{dm}$	烧成中第 $i$ 阶段窑顶表面平均温度		
141	$t_{dm}$	窑顶左侧测定点的温度		
142	$t_{dy}$	窑顶右侧测定点的温度		
143	$t_{dz}$	窑顶中间测定点的温度		
144	$t'_g$	最高烧成温度		
145	$t'_j$	最高烧成温度时窑车金属温度		℃
146	$t_{cm}$	烧成中第 $i$ 阶段窑车下部温度		
147	$t_q$	最高温度时窑墙内表面温度		
148	$t'_{qi}$	最高温度时窑墙第 $i$ 层耐火材料温度		
149	$t_{qm}$	烧成中第 $i$ 阶段窑墙表面平均温度		
150	$t_{qs}$	窑墙上部测定点的温度		
151	$t_{qs}$	窑墙下部测定点的温度		
152	$t_{qs}$	窑墙中部测定点的温度		
153	$t'_{zi}$	烧成中第 $i$ 阶段灰渣温度		
154	$t'_{ti}$	烧成中第 $i$ 阶段炉膛内温度		
155	$t'_{yi}$	烧成中第 $i$ 阶段离窑烟气平均温度		
156	$V^0_y$	理论烟气量	$m^3/kg$ 燃料或 $m^3/m^3$ 燃料	
157	$V'_{yi}$	烧成中第 $i$ 阶段离窑干烟气量		
158	$W_c$	灰渣中含碳率	%	
159	$W_x$	产品中玻璃相的质量分数		

续表 A 1

序号	符号	说 明	单 位
支 出 项			
160	$X_{CO_i}$	烧成中第 i 阶段干烟气中一氧化碳体积分数	%
161	$X_i$	燃料或烟气中各种气体体积分数	
162	$X_O$	烟气中氧气体积分数	
163	$a_{ci}$	第 i 阶段窑车对空气综合传热系数	kJ/(m·h·℃)
164	$a_{di}$	第 i 阶段窑顶对空气综合传热系数	
165	$a_{qi}$	第 i 阶段窑墙对空气综合传热系数	
166	$a_{si}$	第 i 阶段窑内平均空气过剩系数	
167	$a_{yi}$	第 i 阶段烟气中空气过剩系数	
168	$e$	窑体外表面的黑度	
169	$\phi$	门孔系数	
170	$\omega_{yi}$	烧成中第 i 阶段烟气流速	m/s
热 效 率 项			
171	$Q_d$	单位产品的烧成能耗	kJ/kg产品
172	$Q'_g$	产品烧成至最高温度时净耗热	
173	$Q_{jb}$	窑具材料加热到最高温度时净耗热	
174	$Q_{py}$	烧成产品的有效热	
175	$Q'_q$	坯体水分蒸发和加热水蒸气净耗热	
176	$Q_{sy}$	含窑具材料在内的有效热	
177	$\eta_p$	烧成产品的窑炉热效率	%
178	$\eta_x$	含窑具材料在内的窑炉热效率	

## 附录 B

## 记录、测定事项一览表

(补充件)

表 B 1 窑炉基本情况记录表

厂名					
厂址					
窑炉类型					
燃料种类					
项 目		单 位	数 值	备 注	
产 品	品 种				
	产量 $m_h$		kg/窑		
窑 体	窑	拱 高	m		
		内 径			
		侧 墙 高			
		窑墙厚度			
		窑内容车数	台		
		吸火孔面积	$m^2$		
		吸火孔尺寸	m		
基 本 结 构	燃 烧 室	对 数	对		
		规格(长×宽×高)	m		
		型 号			
		容 量	$m^3$		
基 本 结 构	风 机	型号		铭 牌 值	
		容量	$m^3/h$		
		风压	Pa		
	烟 系 统	烟	烟道截面积 $A_f$	$m^2$	
			动压 $p_f$	Pa	
			流速 $\omega_f$	m/s	
			离窑干烟气量 $V_f$	$m^3$	
			理论烟气量 $V^0_f$	$m^3/kg$ 燃料 $m^3/m^3$ 燃料	
	烟窗小大(内径×高)	m			
	窑内断面温差情况及产品烧成质量情况				
烧成气氛要求					
烟气带走热占总能耗分数					
燃烧调节方式					

表 B 2 热平衡实测数据综合表

测定人员			
测定时间	起	年 月 日 时	
	止	年 月 日 时	
测定项目		单 位	数 据
外界条件	天气		
	大气压强 $p_d$		Pa
	室外温度		℃
	环境温度	干球温度	
湿球温度			
燃 料	特性	含水率 $W_r$	%
		密度 $d_{15}^{15}$	kg/m <sup>3</sup>
	组成	液体燃料	
		气体燃料	
固体燃料			
应用基时燃料的低位发热量 $Q_{l,w}$		kJ/kg燃料或 kJ/m <sup>3</sup> 燃料	
燃料的消耗量 $m_f$		kg/kg产品或 m <sup>3</sup> /kg产品	
燃料入窑的温度 $t_f$		℃	
燃 烧 用 空 气 量	烧成中的平均空气过剩系数 $\alpha_s$		
	理论空气量 $V_k^0$		m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> 燃料或 m <sup>3</sup> /kg燃料
	雾化空气管道截面积 $A_w$		m <sup>2</sup>
	动压 $p_w$		Pa
	流速 $\omega_w$		m/s
	雾化空气量 $V_{k,w}$		m <sup>3</sup> /kg产品
	雾化空气入窑温度 $t_{k,w}$		℃
	助燃空气入窑温度 $t_k$		
	助燃空气管道截面积 $A_k$		m <sup>2</sup>
	动压 $p_k$		Pa
	流速 $\omega_k$		m/s
	雾化空气量 $V_k$		m <sup>3</sup> /kg产品
	雾化蒸汽温度 $t_s$		℃
雾化蒸汽流量 $V_s$		m <sup>3</sup> /kg产品	

续表 B 2

测 定 项 目		单 位	数 据	
坯 体 化 学 组 成	SiO <sub>2</sub>		%	
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			
	CaO			
	MgO			
	K <sub>2</sub> O			
	Na <sub>2</sub> O			
	体 分	坯体入窑相对平均含水率W <sub>0</sub>		kg/kg产品
干坯体结构水质量m <sub>0</sub>				
坯体入窑的温度t <sub>0</sub>		℃		
产 品	产品最高烧成温度t' <sub>0</sub>		%	
	产品中玻璃相质量分数W'			
窑 车	窑内容纳车数		台	
	每 kg 产品 窑车质量	金属m <sub>1</sub>	kg/kg产品	
		耐火衬砖m <sub>0</sub>		
	温 度	入 窑 处	金属t <sub>1</sub>	℃
耐火衬砖t <sub>0</sub>				
出 窑 处		金属t' <sub>1</sub>		
		耐火衬砖t' <sub>0</sub>		
匣 钵 辅 助 材 料	质 量	匣钵m <sub>2</sub>	kg/kg产品	
		辅助材料m <sub>1</sub>		
	温 度	入 窑 处	匣钵t <sub>2</sub>	℃
			辅助材料t <sub>1</sub>	
出 窑 处		匣钵t' <sub>2</sub>		
		辅助材料t' <sub>1</sub>		

表 B 3 窑炉烧成中各阶段燃料消耗量及烟气的组成

烧成阶段序号	烧成温度范围(°C)	烧成时间(h)	燃料消耗量(kg)	每小时燃料消耗量(kg)	灰渣温度(°C)	灰渣中含碳量(%)	离窑烟气测定结果				
							CO	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	a	离窑烟气温度(°C)
1											
2											
3											
4											
5											
6											
7											
8											
9											
10											

总烧成时间(h):

表 B 4 各烧成阶段中窑墙、窑顶温度一览表 °C

烧成阶段序号	窑 墙 温 度			窑 顶 温 度			窑底温度
	内表面温度	外表面温度	周围空气温度	内表面温度	外表面温度	周围空气温度	
点火前							
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							

表 B 5 窑体各层材料点火前和高温保温阶段界面温度

阶段序号	窑体材料层数	窑墙各层材质、厚度、导热系数及界面温度				窑顶各层材质、厚度、导热系数及界面温度			
		材质	厚度(mm)	导热系数(W/m·°C)	界面温度(°C)	材质	厚度(mm)	导热系数(W/m·°C)	界面温度(°C)
点火前									
高温保温时									

## 附录 C

## 主要热工测试仪表的规格型号

(参考件)

序号	名称	型号	量程	精度
1	铂铑30—铂铑6热电偶	WRLR—110	0~1600℃	≤600℃时, ±3℃ >600℃时, ±0.005t
2	镍铬—镍硅热电偶	WRNZ—328	0~1000℃	≤400℃时, ±4℃ >400℃时, ±0.0075t
3	镍铬—考铜热电偶	WREZ—328	0~600℃	≤300℃时, ±4℃ >300℃时, ±0.1t
4	表面温度计	WREU—890M	0~300℃ 0~600℃	<0.04t
5	热流计	NWY—2	湿度: -40~200℃ 热流: 0~8000~ 80000kJ/(m <sup>2</sup> ·h)	<0.05t —
6	热球式电风速计	QDF—2A QDF—3	0.05~10m/s 0.05~30m/s	0.05~2m/s时 <±0.1ω 2~30m/s时 <±0.05ω
7	高温风速计	6161	温度: 0~500℃ 速度: 0~10m/s 0~50m/s	0.01t±1℃ ≤±0.1ω ≤±0.05ω
8	补偿式微压计	YJB—150	0~1500Pa	<1.2Pa
9	倾斜式压力计	2Y—200	0~2000Pa	1级
10	奥氏气体分析仪			

注: ① t 为被测物质的温度, ℃。

② ω 为被测物质的流速, m/s。

## 附加说明:

本标准由中国轻工总会经济贸易部提出。

本标准由全国陶瓷标准化中心归口。

本标准由中国陶瓷工业协会节能技术中心起草。

本标准主要起草人: 赵德麟、陈立骏、张儒岭。