

中华人民共和国轻工行业标准

QB/T 1493—1992

日用陶瓷火焰隧道窑热平衡、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火焰隧道窑的热平衡、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、固体和气体燃料的火焰隧道窑的热平衡、热效率的测定与计算。对于生产其他类型陶瓷产品的隧道窑其热平衡、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

GB/T 211 煤中全水分的测定方法

GB/T 212 煤的工业分析方法

GB/T 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 $1\text{ cal}=4.181\ 6\text{ J}$

毫米水柱与帕斯卡的换算为: $1\text{ mmH}_2\text{O}=9.806\ 6\text{ Pa}$

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°C ,即 $T_0=273.15\text{ K}$ 。

物料基准 1 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 F 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 了解所测隧道窑的设计、生产及维修史,并按附录 B 表 B1 填写隧道窑基本情况。

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

中华人民共和国轻工业部 1992-04-14 批准

1992-12-01 实施

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。

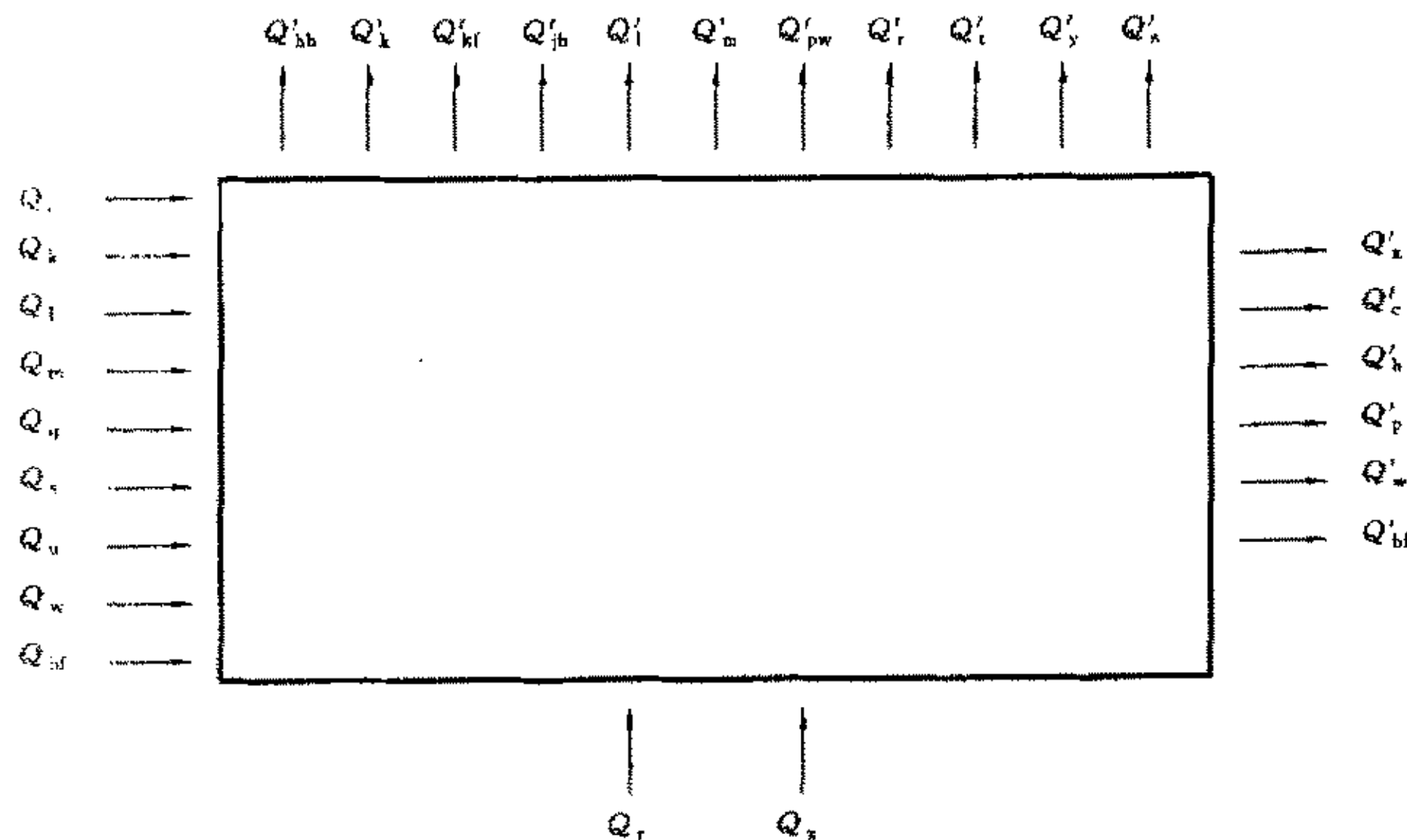


图 1 热平衡方框图

4.2.2 本标准对日用陶瓷火焰隧道窑体系的划分,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(包括车下坑道在内)以地平面为界。界线以外(如干燥器等)均不在体系内。余热利用单独计算。

注:余热锅炉包括在体系内。

4.3 测定时间

4.3.1 隧道窑至少要稳定在一个烧成周期后方可进行测定。

4.3.2 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离开窑体的时间。

4.4 测定步骤

4.4.1 先对隧道窑进行试验性测试。

4.4.2 测试和正式测定期间所用原料、燃料成分及坯体装入量等生产条件均应稳定一致。

4.4.3 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 F 的格式写明测定用仪器的型号及精度。

4.6.2 隧道窑的基本情况按附录 B 表 B1 逐项填写。

4.6.3 实测数据综合表按附录 B 表 B2 逐项填写。

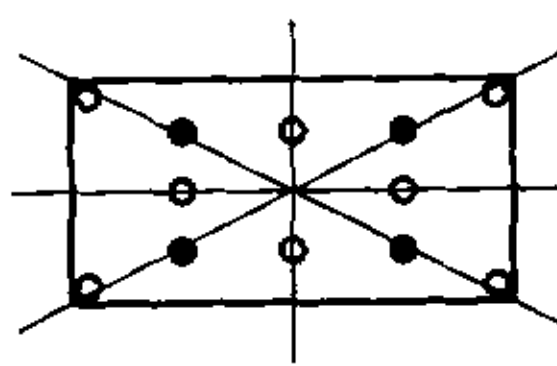
QB/T 1493—1992

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 度	1. 燃 料 入 窑 温 度 $t_r, ^\circ\text{C}$	对油、气全周期记录;对煤 2~4 h 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	使用电阻温度计和玻璃温度计测量,取平均值
	2. 周围空气的温度 $t_a, ^\circ\text{C}$	每隔 2~4 h 测量一次	于空气流通处且不受窑温影响的地方	
	3. 漏入空气的温度 $t_b, ^\circ\text{C}$			
	4. 助燃空气入窑温度 $t_k, ^\circ\text{C}$		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	
	5. 雾化空气入窑温度 $t_{kw}, ^\circ\text{C}$		烧嘴前雾化空气管道截面中心取点	
	6. 雾化蒸汽入窑温度 $t_q, ^\circ\text{C}$		烧嘴前雾化蒸汽管道截面中心取点	
	7. 气 幕 入 窑 温 度 $t_m, ^\circ\text{C}$		气幕管道入窑前 1~2 m 处截面中心取点	
	8. 冷却空气入窑温度 $t_l, ^\circ\text{C}$		冷风管道入窑前 1~2 m 处截面中心取点	
	9. 离 窑 烟 气 温 度 $t_y', ^\circ\text{C}$			总烟道和支烟道汇交处截面中心点
	10. 烟气进余热利用装置温度 $t_{yj}, ^\circ\text{C}$		余热利用装置入口烟气管道测动压截面中心取点	
	11. 烟气出余热利用装置温度 $t_{yc}, ^\circ\text{C}$		余热利用装置出口烟气管道测动压截面中心取点	
	12. 抽 出 热 风 温 度 $t_h', ^\circ\text{C}$		热风管道离窑 1~2 m 处截面中心取点	
	13. 坯 体 入 窑 温 度 $t_n, ^\circ\text{C}$		窑车最上层和中部的边角处取样	使用热电阻温度计、表面温度计或点温度计测量,取平均值
	14. 产 品 出 窑 温 度 $t_p', ^\circ\text{C}$	每隔 2~4 h 测量一次,在入窑前和出窑后 10 min 内测量	窑车前、后、左、右及中部钵内制品	
	15. 窑车金属入窑温度 $t_{js}, ^\circ\text{C}$		窑车金属部分测前、后及轮三点	
	16. 窑车金属出窑温度 $t_{jp}, ^\circ\text{C}$			
	17. 窑车耐火衬砖入窑温度 $t_n, ^\circ\text{C}$			

QB/T 1493—1992

表 1(续)

测定项目	参 数	测定时间	测点选择	测定方法	
温 度	18. 窑车耐火衬砖出窑温度 t_a' , °C	每隔 2~4 h 测量一次, 在入窑前和出窑后 10 min 内测量	窑车砖表面取四角四个点及四周各面中心四个点和在纵横中心线各均布两个点, 在对角线各均布两个至台内中心的孔, 如下图所示, 预先布置在两辆具有代表性窑车上, 或用热流法计算  ○ 台表面测温点 ● 台表面至台内中心测温孔	使用热电阻温度计、表面温度计或点温度计测量, 取平均值	
	19. 匣钵入窑温度 t_b , °C		窑车前、后、左、右及中部柱体, 取钵内、外的平均温度		
	20. 匣钵出窑温度 t_b' , °C				
	21. 辅助材料入窑温度 t_c , °C				窑车前、后、左、右及中部柱体取点
	22. 辅助材料出窑温度 t_c' , °C				
	23. 产品最高烧成温度 t_g , °C	全测定周期	选三个代表性窑车做测温车, 在每个车的同一断面上按上、中、下、左、中、右九点放入匣钵内九个测温锥组	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	
	24. 灰渣的平均温度 t_f , °C	于灰渣离开炉栅前测定	在每只炉栅灰渣层深度中部处	使用镍铬-镍硅热电偶和配用电子电位差计测定, 取平均值	
	25. 窑顶各个测区表面平均温度 t_w , °C	测定开始时进行	先用点温度计或表面温度计沿窑长方向找出表面温度改变相近区为一个测区。在测区内, 窑墙选定上、中、下若干个测点; 窑顶选定左、中、右若干个测点	使用表面温度计或点温度计测量, 取其平均温度作为各个测区的温度	
	26. 窑墙各个测区表面平均温度 t_w , °C				
	27. 炉膛内的温度 t_l , °C	每隔 2~4 h 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	
	28. 入炉水的温度 t_w , °C		在余热锅炉入炉前和出炉后的管道上	使用玻璃温度计或点温度计测定	
	29. 出炉蒸汽温度 t_w' , °C				
	30. 重油乳化水温度 t_w , °C		在乳化装置前管道上		

QB/T 1493—1992

表 1(续)

测定项目	参 数	测定时间	测点选择	测定方法
热 流	1. 窑顶表面平均热流密度 $q_d, \text{W/m}^2$	测定开始时进行	用点温计或表面温度计找出表面温度改变相近区定为一个测区	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
	2. 窑墙表面平均热流密度 $q_w, \text{W/m}^2$			
	3. 窑体各个测区表面积 A_i, m^2	测定前	整个窑体表面	用米尺实际测量后计算
气 流	1. 测点处管道截面积 A_1, 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_1, Pa	每隔 4 h 测量一次	在所测量截面处按附录 G 确定测点数	毕托管和补偿式微压计或倾斜式压力计
	3. 流速 $\omega_1, \text{m/s}$			热球式电风速计测量
	4. 测点处管道截面积 A_m, 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_m, Pa	每隔 4 h 测量一次	在所测量截面处按附录 G 确定测点数	毕托管和补偿式微压计或倾斜式压力计
	6. 流速 $\omega_m, \text{m/s}$			热球式电风速计测量
	7. 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
	8. 动压 p_k, Pa	每隔 4 h 测量一次	在所测量截面处按附录 G 确定测点数	毕托管和补偿式微压计或倾斜式压力计
	9. 流速 $\omega_k, \text{m/s}$			热球式电风速计测量
	10. 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
	11. 动压 p_w, Pa	每隔 4 h 测量一次	在所测量截面处按附录 G 确定测点数	毕托管和补偿式微压计或倾斜式压力计
	12. 流速 $\omega_w, \text{m/s}$			热球式电风速计测量
	13. 雾化蒸汽流量 $V_q, \text{m}^3/\text{s}$	全测定周期	烧嘴前蒸汽主管道处选面	使用蒸汽流量计测量
	14. 测点处管道截面积 A_l, m^2	测定前	风管直管部位($>3D$)处选面	钢卷尺测量后计算
	15. 动压 p_l, Pa	每隔 4 h 测量一次	在所测量截面处按附录 G 确定测点数	毕托管和补偿式微压计或倾斜式压力计
	16. 流速 $\omega_l, \text{m/s}$			高温风速计测量

QB/T 1493—1992

表 1(续)

测定项目		参 数	测定时间	测点选择	测定方法
气 流	烟 气	17. 测点处管道截面积 A_y, m^2	测定前	汇总烟道直管部位($>3D$)处选面	钢卷尺测量后计算
		18. 动压 p_y, Pa	每隔 4 h 测量一次	在所测量截面处按附录 G 确定测点数	毕托管和补偿式微压计或倾斜式压力计
		19. 流速 $w_y, \text{m/s}$			高温风速计测量
质 量		1. 燃料的消耗量 $m_f, \text{kg/kg 产品}$	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 $m_k, \text{kg/kg 产品}$	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,由全周期换算得到
		3. 窑车耐火衬砖质量 $m_n, \text{kg/kg 产品}$			
		4. 坯体入窑质量 $m_s, \text{kg/kg 产品}$	全测定周期	坯体入窑处	记录各个窑车的坯体数、单重及其类型后计算
		5. 出窑产品质量 m_p, kg		总体或随机抽取各类产品 10 件	测量每车的总量或随机抽样称量后计算总量
		6. 坯体质量 $m_b, \text{kg/kg 产品}$	测定前	坯体入窑处	实际称量各个窑车上的装入量
		7. 辅助材料的质量 $m_l, \text{kg/kg 产品}$			
		8. 灰渣质量 $m'_z, \text{kg/kg 产品}$	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	用校正过的磅秤直接称出灰渣的排出量,由全周期换算得到;或根据燃料消耗量,煤中灰分的质量分数及灰渣中的含碳率计算得到
		9. 余热锅炉蒸发量 $m'_w, \text{kg/kg 产品}$	全测定周期	进水总管	测量全周期用量,取平均值,一般用转子流量计测定
		10. 重油乳化水量 $m_w, \text{kg/kg 产品}$		在重油掺水装置前管道上	
气 体 分 析		1. 燃烧产物组成, %	每隔 2~4 h 测量一次	窑道内分别取样	取四次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, %		汇总烟道断面中部取样	
其 他		1. 燃料的低位发热量 $Q_{\text{low}}, \text{kJ/kg 燃料}$ (kJ/m^3 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。气体燃料用奥式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,详见附录 C

QB/T 1493—1992

表 1(完)

测定项目	参 数	测定时间	测点选择	测定方法
其 他	2. 坯体入窑平均含水率 $W_r, \%$	每隔 4 h 测量一次	窑车中层边角处取样	取测温的坯体置于已知恒重的称量瓶中,用感量为 0.001 g 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		火箱前煤堆取样
	4. 煤中灰分分数 $W_h, \%$		见 GB/T 211 和 GB/T 212	
	5. 燃料含水率 $W_r, \%$	每隔 4 h 测量一次		在离窑前的灰渣中取样
	6. 灰渣中的含碳率 $W_r, \%$			
	7. 余热锅炉的工作压力 p_g, Pa	全测定周期	进水总管	一般用工业单圈弹簧管压力表测量,取全周期平均值

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。

5.2 收入项

5.2.1 坯体入窑质量 $m_s, \text{kg/kg}$ 产品

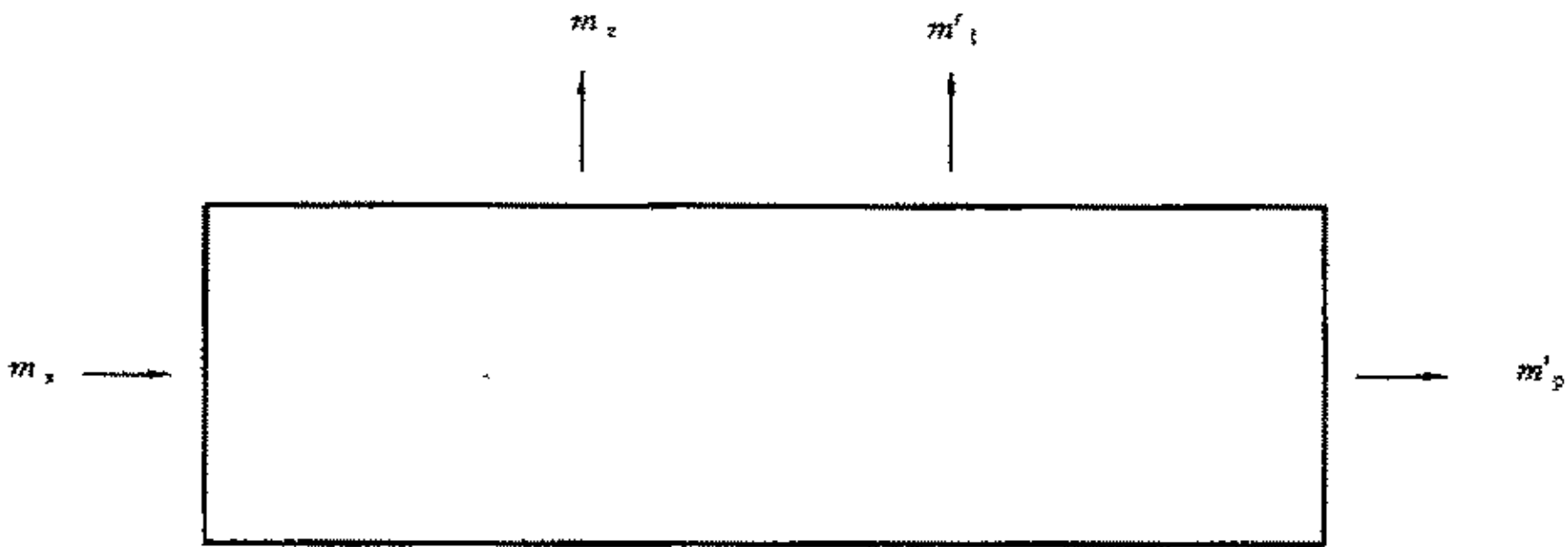


图 2 物料平衡图

5.3 支出项

5.3.1 出窑产品质量 m'_p ,按 1 kg 计

5.3.2 坯体中自由水质量 $m_s, \text{kg/kg}$ 产品

$$m_s = m_g \cdot W_r \dots\dots\dots (1)$$

式中: W_r ——坯体入窑的平均相对含水率, %。

5.3.3 干坯体烧失减量 $m'_g, \text{kg/kg}$ 产品

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

QB/T 1493—1992

式中: m_x ——干坯体入窑质量, kg/kg 产品。

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

5.4 物料平衡

$$m_s = m_p' + m_x + m_l' \quad \dots\dots\dots(3)$$

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

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

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

Q_{Dw}^y ——燃料应用基时的低位发热量, kJ/kg 燃料或 kJ/ m^3 燃料, 见附录 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, $^{\circ}\text{C}$;

W_r ——燃料的含水率, %;

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

重油燃料: $c_r = 1.74 + 0.0025 t_r$

气体燃料: $c_r = 0.01 \Sigma(x_i \cdot c_i)$

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 $\cdot$ $^{\circ}\text{C}$), 见附录 E 表 E4。

6.1.3 助燃空气带入的显热 Q_k , kJ/kg 产品

$$Q_k = V_k \cdot c_k \cdot t_k \quad \dots\dots\dots(6)$$

式中: c_k ——助燃空气的比热容, kJ/(m^3 $\cdot$ $^{\circ}\text{C}$), 见附录 E 表 E4;

t_k ——助燃空气入窑的温度, $^{\circ}\text{C}$;

V_k ——助燃空气量, m^3 /kg 产品。

$$V_k = \alpha_s \cdot m_r \cdot V_k^0$$

式中: α_s ——烧成带的平均空气过剩系数;

V_k^0 ——理论空气量, m^3 /kg 或 m^3/m^3 燃料, 见附录 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。

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

式中: Q_{kk} ——雾化空气和助燃空气带入的显热, kJ/kg 产品;

V_{kw} ——雾化空气量, m^3 /kg 产品, 实际测量的;

c_{kw} ——雾化空气的比热容, kJ/(m^3 $\cdot$ $^{\circ}\text{C}$), 见附录 E 表 E4;

t_{kw} ——雾化空气入窑的温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

6.1.4 雾化蒸汽带入的显热 Q_q , kJ/kg 产品

$$Q_q = 1.93 m_q \cdot t_q \quad \dots\dots\dots(8)$$

式中: 1.93——雾化蒸汽在 $0 \sim 250^{\circ}\text{C}$ 之间的平均比热容, kJ/(kg $\cdot$ $^{\circ}\text{C}$);

m_q ——雾化蒸汽质量, kg/kg 产品(蒸汽体积与质量的换算见附录 E 表 E8);

t_q ——雾化蒸汽入窑的温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

6.1.5 重油乳化用水带入显热 Q_w , kJ/kg 产品

$$Q_w = 4.1816 m_w \cdot t_w \quad \dots\dots\dots(9)$$

式中: 4.181 6——水的比热容, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$;

m_w ——重油乳化用水质量, kg/kg 产品;

t_w ——重油乳化用水温度, $^\circ\text{C}$ 。

6.1.6 气幕带入的显热 Q_m , kJ/kg 产品

$$Q_m = V_m \cdot c_m \cdot t_m \quad \dots\dots\dots (10)$$

式中: V_m ——气幕用气体量, m^3/kg 产品;

c_m ——气幕用气体的比热容, $\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$, 见附录 E 表 E4;

t_m ——气幕用气体入窑温度, $^\circ\text{C}$ 。

6.1.7 预热带漏入空气带入的显热 Q_u , kJ/kg 产品

$$Q_u = (V_u - V_m) \cdot c_u \cdot t_u \quad \dots\dots\dots (11)$$

式中: c_u ——预热带漏入空气的比热容, $\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$, 见附录 E 表 E4;

t_u ——预热带漏入空气的温度, $^\circ\text{C}$;

V_u ——预热带漏入空气量, m^3/kg 产品。

$$V_u = m_r \cdot (a_y - a_s) \cdot V_k^0$$

式中: a_y ——排出烟气中的空气过剩系数。

6.1.8 冷却空气带入的显热 Q_l , kJ/kg 产品

$$\begin{aligned} Q_l &= \Sigma(V_l \cdot c_l \cdot t_l) \\ &= V_y \cdot c_y \cdot t_y + V_s \cdot c_s \cdot t_s + V_j \cdot c_j \cdot t_j + V_c \cdot c_c \cdot t_c \quad \dots\dots\dots (12) \end{aligned}$$

式中: V_y, V_s, V_j, V_c ——分别表示窑尾直接冷却风、急冷风、间接冷却风和车下冷却风的送入空气量, m^3/kg 产品;

c_y, c_s, c_j, c_c ——分别表示窑尾直接冷却风、急冷风、间接冷却风和车下冷却风的冷空气比热容, $\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$, 见附录 E 表 E4;

t_y, t_s, t_j, t_c ——分别表示窑尾直接冷却风、急冷风、间接冷却风和车下冷却风的冷空气入窑温度, $^\circ\text{C}$ 。

6.1.9 坯体带入的显热 Q_s , kJ/kg 产品

$$Q_s = Q_g + Q_w = m_s \cdot (1 - W_s) \cdot c_g \cdot t_s + 4.181 6 m_s \cdot W_s \cdot t_s \quad \dots\dots\dots (13)$$

式中: Q_g ——干坯体带入的显热, kJ/kg 产品;

Q_w ——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, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$, 见附录 E 表 E3;

t_s ——坯体入窑的温度, $^\circ\text{C}$ 。

6.1.10 窑车带入的显热 Q_c , kJ/kg 产品

$$Q_c = Q_p + Q_n = m_p \cdot c_p \cdot t_p + m_n \cdot c_n \cdot t_n \quad \dots\dots\dots (14)$$

式中: Q_p ——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_p, m_n ——分别表示窑车金属和耐火衬砖的质量, kg/kg 产品;

c_p ——窑车金属的比热容, 取 $0.5 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$;

c_n ——窑车耐火衬砖入窑时的比热容, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$, 见附录 E 表 E3;

t_p, t_n ——分别表示窑车金属和耐火衬砖入窑的温度, $^\circ\text{C}$ 。

6.1.11 窑具材料带入的显热 Q_{bf} , kJ/kg 产品

$$\begin{aligned} Q_{bf} &= Q_b + Q_f \\ &= m_b \cdot c_b \cdot t_b + m_f \cdot c_f \cdot t_f \quad \dots\dots\dots (15) \end{aligned}$$

式中: Q_b ——匣钵带入的显热, kJ/kg 产品;

Q_t ——辅助材料带入的显热, kJ/kg 产品;

m_b, m_t ——分别表示匣钵和辅助材料的质量, kg/kg 产品;

c_b, c_t ——分别表示匣钵和辅助材料入窑时的比热容, kJ/(kg·°C), 见附录 E 表 E3;

t_b, t_t ——分别表示匣钵及辅助材料入窑的温度, °C。

6.1.12 总热收入 Q , kJ/kg 产品

$$Q = Q_r + Q_s + Q_k(\text{或 } Q_{kk}) + Q_q + Q_w + Q_m + Q_u + Q_l + Q_n + Q_c + Q_{bt} \dots\dots\dots (16)$$

6.2 热支出

6.2.1 产品带出的显热 Q'_p , kJ/kg 产品

$$Q'_p = m'_p \cdot c'_p \cdot t'_p \dots\dots\dots (17)$$

式中: c'_p ——产品的平均比热容, kJ/(kg·°C), 见附录 E 表 E3;

t'_p ——产品出窑的温度, °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

$$Q'_{pw} = Q'_f + Q'_{fw} = m_s \cdot (2490 + 1.93 t'_y) + 6700 m_o \dots\dots\dots (18)$$

式中: Q'_f ——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'_{fw} ——坯体中结构水脱水耗热, kJ/kg 产品;

t'_y ——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。

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

W_m, W_c ——分别表示干坯体中氧化镁、氧化钙的质量分数, %。

由于空气中带入的水分其量很小, 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'_b , kJ/kg 产品

$$Q'_b = m_g \cdot (2100W_s + 2823W_c + 2747W_m) \dots\dots\dots (19)$$

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_s ——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

$$Q'_x = 347 \cdot W_x \cdot m'_p \dots\dots\dots (20)$$

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, %。

6.2.5 窑车带出的显热 Q'_c , kJ/kg 产品

$$Q'_c = Q'_{js} + Q'_n = m_{js} \cdot c_{js} \cdot t'_{js} + m_n \cdot c'_n \cdot t'_n \dots\dots\dots (21)$$

式中: Q'_{js} ——窑车金属带出的显热, kJ/kg 产品;

Q'_n ——窑车耐火衬砖带出的显热, kJ/kg 产品;

c'_n ——窑车耐火衬砖出窑时比热容, kJ/(kg·°C), 见附录 E 表 E3;

t'_{js}, t'_n ——分别表示窑车金属和耐火衬砖出窑的温度, °C。

6.2.6 窑具材料带出的显热 Q'_{bt} , kJ/kg 产品

$$Q'_{bt} = Q'_b + Q'_t = m_b \cdot c'_b \cdot t'_b + m_t \cdot c'_t \cdot t'_t \dots\dots\dots (22)$$

式中: Q'_b ——匣钵带出的显热, kJ/kg 产品;

Q'_t ——辅助材料带出的显热, kJ/kg 产品;

c'_b, c'_t ——分别表示匣钵及辅助材料出窑时的比热容, kJ/(kg·°C) 见附录 E 表 E3;

QB/T 1493—1992

t'_b, t'_c ——分别表示匣钵及其辅助材料出窑的温度,℃。

6.2.7 干烟气带走的显热 Q'_y , kJ/kg 产品

$$Q'_y = m_r \cdot V'_y \cdot c'_y \cdot t'_y \quad \dots\dots\dots (23)$$

式中: c'_y ——干烟气的比热容, kJ/(m³ · °C);

$$c'_y = 0.01 \Sigma(x_i \cdot c_i)$$

V'_y ——离窑干烟气量, m³/kg 燃料或 m³/m³ 燃料。

注: V'_y 值的计算方法见附录 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'_s , kJ/kg 产品

$$Q'_s = (m'_s - m_w)(2490 + 1.93 t'_y) + 1.93 m_q \cdot t'_y \quad \dots\dots\dots (24)$$

式中: m'_s ——燃料燃烧生成水质量, kg/kg 产品。

$$m'_s = m \cdot m_r$$

注: m 的计算见附录 D 中 D2。

6.2.9 窑体表面散热损失 Q'_m , kJ/kg 产品

6.2.9.1 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:

$$Q'_m = 3.6 \Sigma(q_i \cdot A_i) / m'_b \quad \dots\dots\dots (25)$$

式中: q_i ——窑体各个测区的平均热流密度, W/m²;

A_i ——窑体各个测区的表面积, m²;

m'_b ——产品小时质量, kg/h。

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

$$Q'_m = Q'_{qm} + Q'_{dm} \quad \dots\dots\dots (26)$$

式中: Q'_{qm}, Q'_{dm} ——分别表示窑墙和窑顶表面的散热损失, kJ/kg 产品。

$$Q'_{qm} = [\Sigma a_{qi} \cdot (t_{qi} - t_o) \cdot A_{qi}] / m'_b$$

$$Q'_{dm} = [\Sigma a_{di} \cdot (t_{di} - t_o) \cdot A_{di}] / m'_b$$

式中: t_{qi}, t_{di} ——分别表示窑墙、窑顶各个测区的表面平均温度, °C;

t_o ——周围空气的温度, °C;

A_{qi}, A_{di} ——分别表示窑墙、窑顶各个测区的表面积, m²。

$$t_{qi} = \frac{\left(\frac{t_{qs} + t_{qz}}{2} \right) + \left(\frac{t_{qz} + t_{qx}}{2} \right)}{2}$$

$$t_{di} = \frac{\left(\frac{t_{du} + t_{dz}}{2} \right) + \left(\frac{t_{dz} + t_{dy}}{2} \right)}{2}$$

式中: t_{qs}, t_{qz}, t_{qx} ——分别表示窑墙上部、中部、下部测点的温度, °C;

t_{du}, t_{dz}, t_{dy} ——分别表示窑顶左侧、中间、右侧测点的温度, °C;

a_{qi}, a_{di} ——分别表示第 i 段测得的窑墙、窑顶对空气的综合传热系数, kJ/(m² · h · °C)。

$$a_{qi} = 9.20 \sqrt[4]{(t_{qi} - t_o)} + \frac{20.40\epsilon \cdot \left[\left(\frac{t_{qi} + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_o + 273}{100} \right)^4 \right]}{t_{qi} - t_o}$$

$$a_{di} = 11.70 \sqrt[4]{(t_{di} - t_o)} + \frac{20.40\epsilon \cdot \left[\left(\frac{t_{di} + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_o + 273}{100} \right)^4 \right]}{t_{di} - t_o}$$

式中: ϵ ——窑体外表面的黑度, 一般取 0.8~0.9(各种材料黑度见附录 E 表 E7)。

6.2.10 抽热风带走的显热 Q'_k , kJ/kg 产品

QB/T 1493—1992

$$Q'_k = \Sigma(V'_2 \cdot c'_2 \cdot t'_2) = V'_2 \cdot c'_2 \cdot t'_2 + V'_1 \cdot c'_1 \cdot t'_1 + V'_3 \cdot c'_3 \cdot t'_3 \quad \dots\dots\dots(27)$$

式中: V'_2, V'_1, V'_3 ——分别表示直接抽热风、间接抽热风和车下抽热风的抽出热风量, m^3/kg 产品;

c'_2, c'_1, c'_3 ——分别表示直接抽热风、间接抽热风和车下抽热风的热空气平均比热容, $\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$, 见附录 E 表 E4;

t'_2, t'_1, t'_3 ——分别表示直接抽热风、间接抽热风和车下抽热风的热空气出窑温度, $^\circ\text{C}$ 。

6.2.11 化学不完全燃烧热损失 Q'_{hb} , kJ/kg 产品

$$Q'_{hb} = 12\,628 x_{co} \cdot V'_y \quad \dots\dots\dots(28)$$

式中: 12 628——每立方标米一氧化碳的反应热, kJ/m^3 ;

x_{co} ——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

$$Q'_{jb} = 33\,871 (m'_r - m_r \cdot W_h) \quad \dots\dots\dots(29)$$

式中: 33 871——每千克碳的反应热, kJ/kg ;

W_h ——煤中灰分的质量分数, %;

m'_r ——灰渣的质量, kg/kg 产品。实际称量或者采用下式计算:

$$m'_r = \frac{m_r \cdot W_h}{1 - W_r}$$

式中: W_r ——灰渣中的含碳率, %。

6.2.13 灰渣带走的显热 Q'_r , kJ/kg 产品

$$Q'_r = m'_r \cdot c'_r \cdot t'_r \quad \dots\dots\dots(30)$$

式中: c'_r ——灰渣的比热容, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$, 见附录 E 表 E6;

t'_r ——灰渣的平均温度, $^\circ\text{C}$ 。

6.2.14 余热锅炉水蒸发吸热 Q'_w , kJ/kg 产品

$$Q'_w = m'_w \cdot (H'_q - H_w) \quad \dots\dots\dots(31)$$

式中: m'_w ——余热锅炉水的蒸发量, kg/kg 产品;

H'_q ——出炉蒸汽热焓, kJ/kg , 见附录 E 表 E2;

H_w ——入炉水热焓, kJ/kg , 见附录 E 表 E2。

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

$$Q'_{kl} = C_o \cdot \left[\left(\frac{t'_l + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_o + 273}{100} \right)^4 \right] \cdot A_o \cdot \phi / m'_b \quad \dots\dots\dots(32)$$

式中: C_o ——黑体辐射系数, 等于 $20.4 \text{ kJ}/(\text{h} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$;

t'_l ——炉膛内的平均温度, $^\circ\text{C}$;

A_o ——孔口辐射面积, m^2 ;

ϕ ——门孔系数, 取决于小孔的形状、尺寸及窑墙的厚度, 查图 3。

6.2.16 冷却带排放气体和窑门逸出气体带出显热 Q'_l , kJ/kg 产品

$$Q'_l = Q'_{lp} + Q'_{lm} = V'_{lp} \cdot c'_{lp} \cdot t'_{lp} + V'_{lm} \cdot c'_{lm} \cdot t'_{lm} \quad \dots\dots\dots(33)$$

式中: Q'_{lp}, Q'_{lm} ——分别为冷却带排放气体带出显热和窑门逸出气体热损失, kJ/kg 产品;

V'_{lp}, V'_{lm} ——分别为冷却带排放和窑门逸出气体量, m^3/kg 产品;

c'_{lp}, c'_{lm} ——分别为冷却带排放和窑门逸出气体的比热容, $\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$;

t'_{lp}, t'_{lm} ——分别为冷却带排放和窑门逸出气体的温度, $^\circ\text{C}$ 。

6.2.17 其他热损失 Q'_l , kJ/kg 产品

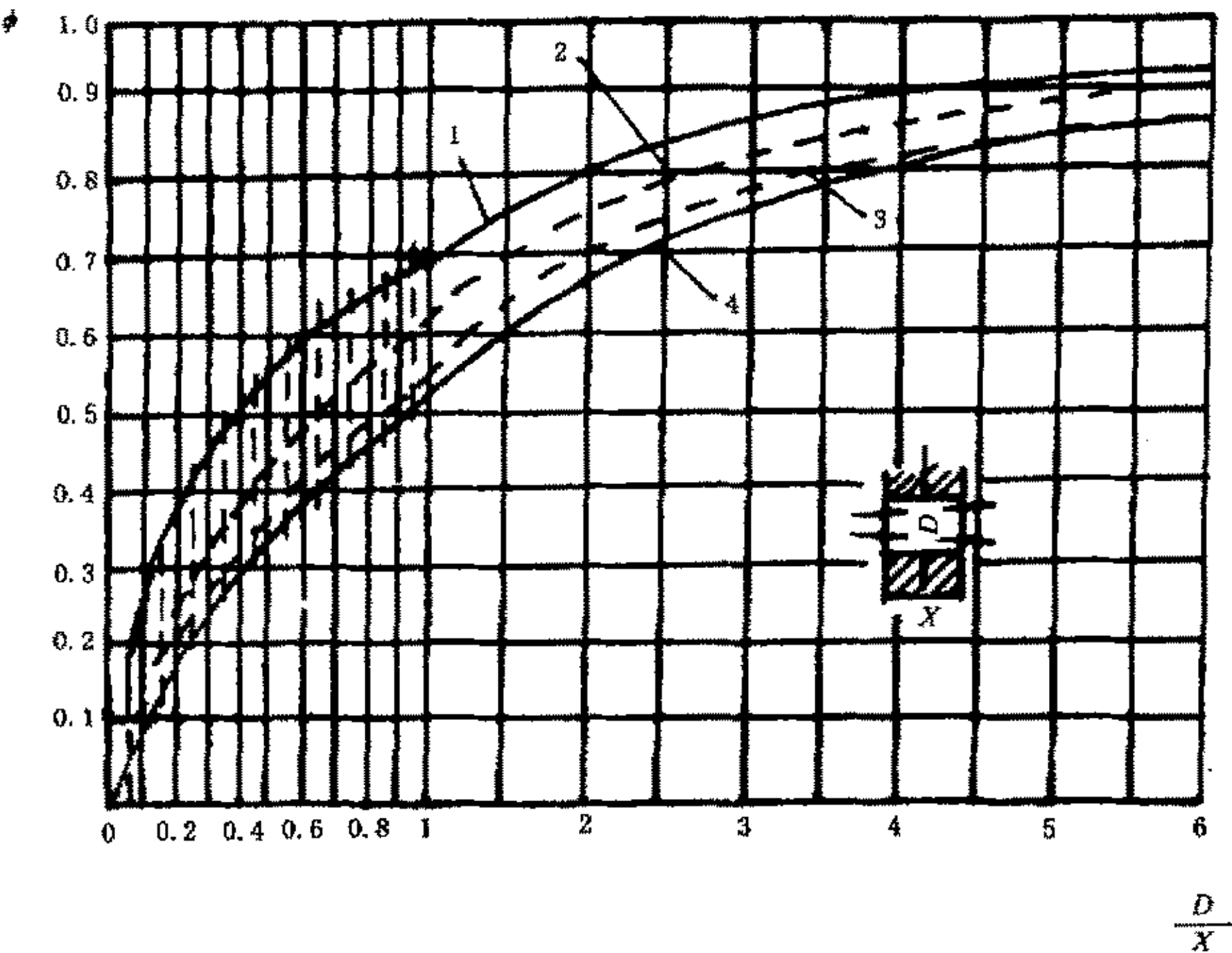
包括开启窑门和窑体各孔洞等处逸出气体热损失以及窑底部向地基的散热损失和氧化铁还原消耗燃料燃烧热等项目。

$$Q'_l = Q - (Q'_p + Q'_{pw} + Q'_h + Q'_c + Q'_{bf} + Q'_y + Q'_m + Q'_k + Q'_{hb})$$

QB/T 1493—1992

$$- Q'_b + Q'_r + Q'_w + Q'_{kf} + Q'_x + Q'_s + Q'_l \dots\dots\dots (34)$$

其他热损失不宜大于 8%，否则应对测定与计算结果进行复核。



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

6.3 热平衡计算结果记录见表 3。

表 3

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			产品带出的显热 Q'_p		
2	燃料带人的显热 Q_{fz}			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	助燃空气带人的显热 Q_{kz}			坯体烧成过程中物理化学反应 耗热 Q'_l		
4	雾化蒸汽带人的显热 Q_{fs}			坯体烧成中生成玻璃相耗热 Q'_g		
5	重油乳化用水带人的显热 Q_{wz}			窑车带出的显热 Q'_{kc}		
6	气幕带人的显热 Q_m			窑具材料带出的显热 Q'_{kt}		
7	预热带漏入空气带人的显热 Q_{pl}			干烟气带出的显热 Q'_{gs}		
8	冷却空气带人的显热 Q_{cl}			烟气中水蒸气带出的显热 Q'_{gw}		
9	坯体带人的显热 Q_{bt}			窑体表面散热损失 Q'_s		
10	窑车带人的显热 Q_{kc}			抽热风带出的显热 Q'_{kf}		
11	窑具材料带人的显热 Q_{kt}			化学不完全燃烧热损失 Q'_{lb}		
12				机械不完全燃烧热损失 Q'_{ls}		
13				灰渣带走的显热 Q'_l		

QB/T 1493—1992

表 3(完)

序号	热收入 Q			热支出 Q'		
	项 目	kJ/kg 产品	%	项 目	kJ/kg 产品	%
14				余热锅炉水蒸发吸热 Q'_w		
15				炉口及其孔洞辐射热损失 Q'_{lr}		
16				冷却带排放气体和窑门逸出气体带出显热 Q'_l		
17				其他热损失 Q'_i		
18	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

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

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

$$Q'_q = Q'_{pw} - Q_s$$

Q'_{pw} 计算方法见式(18);

Q_s 计算方法见式(13);

Q'_h 计算方法见式(19);

Q'_g ——产品烧成至最高烧成温度时耗热, kJ/kg 产品;

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

t'_g ——最高烧成温度, $^{\circ}\text{C}$;

Q_g 计算方法见式(13);

Q'_x 计算方法见式(20)。

7.2 含窑具材料在内的有效热 Q_{xy} , kJ/kg 产品

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

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

$$Q_{jg} = Q_{bg} + Q_{ig} = m_b \cdot c_{bg} \cdot t'_g + m_l \cdot c_{lg} \cdot t'_g - Q_{bl}$$

式中: Q_{bg} ——匣钵加热到最高烧成温度时耗热, kJ/kg 产品;

Q_{lg} ——辅助材料加热到最高烧成温度时耗热, kJ/kg 产品;

c_{bg}, c_{lg} ——分别表示匣钵和辅助材料最高烧成温度时的比热容, kJ/(kg · $^{\circ}\text{C}$);

Q_{bl} 计算方法见式(15)。

7.3 供给热 Q_{gi} , kJ/kg 产品

$$Q_{gi} = Q_r \quad \dots\dots\dots (37)$$

式中: Q_r 计算方法见式(4)。

7.4 烧成产品的窑炉热效率 η_p , %

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

7.5 含窑具材料在内的窑炉热效率 η_x , %

$$\eta_x = [(Q_{py} + Q_{jg})/Q_{gi}] \times 100 \quad \dots\dots\dots (39)$$

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 产品

$$Q_d = Q_{gi} \quad \dots\dots\dots (40)$$

7.7 余热资源率 η_{zu} , %

$$\eta_{zu} = [(Q'_k + Q'_y + Q'_w + Q'_s + Q'_{pw})/Q_{gi}] \times 100 \quad \dots\dots\dots(41)$$

7.8 余热利用率 η_l , %

$$\eta_l = [(Q'_k + Q_{yy} + Q'_w)/Q_{gi}] \times 100 \quad \dots\dots\dots(42)$$

式中: Q_{yy} ——烟气中已利用的热量, kJ/kg 产品。

$$Q_{yy} = V_{y1} \cdot (c_{y1} \cdot t_{y1} - c_{y2} \cdot t_{y2})$$

式中: V_{y1} ——进余热利用装置烟气量, m^3/kg 产品;

c_{y1} ——进余热利用装置烟气的平均比热容, $kJ/(m^3 \cdot ^\circ C)$;

c_{y2} ——出余热利用装置烟气的平均比热容, $kJ/(m^3 \cdot ^\circ C)$;

t_{y1} ——烟气进余热利用装置温度, $^\circ C$;

t_{y2} ——烟气出余热利用装置温度, $^\circ C$ 。

7.9 余热资源回收率 η_h , %

$$\eta_h = [(Q'_k + Q_{yy} + Q'_w)/(Q'_k + Q'_y + Q'_w + Q'_s + Q'_{pw})] \times 100 \quad \dots\dots\dots(43)$$

7.10 窑炉综合热效率 η_s , %

$$\eta_s = [(Q_{py} + Q'_k + Q_{yy} + Q'_w)/Q_{gi}] \times 100 \quad \dots\dots\dots(44)$$

注: ① 余热利用率: 安装余热利用装置后, 被利用的余热量占供给总能量的百分数。

② 余热资源回收率: 已回收利用余热资源量占总余热资源量的百分数。

③ 本标准中 m^3 为标准立方米符号。

QB/T 1493—1992

附 录 A
符号及角标的说明
(补充件)

表 A1 符号及角标的说明

序 号	符 号	说 明	单 位
收 入 项			
1	A_k	助燃空气管道或人口截面积	m^2
2	A_l	冷却空气的管道截面积	
3	A_m	气幕的管道截面积	
4	A_n	雾化空气的管道截面积	
5	c_a	急冷空气的比热容	$kJ/(m^3 \cdot ^\circ C)$
6	c_b	匣钵入窑时的比热容	$kJ/(kg \cdot ^\circ C)$
7	c_c	车下冷却空气的比热容	$kJ/(m^3 \cdot ^\circ C)$
8	c_d	辅助材料入窑时的平均比热容	$kJ/(kg \cdot ^\circ C)$
9	c_e	干坯体的平均比热容	
10	c_f	间接冷却空气的比热容	$kJ/(m^3 \cdot ^\circ C)$
11	c_g	窑车金属的比热容,取 0.5	$kJ/(kg \cdot ^\circ C)$
12	c_h	助燃空气的比热容	$kJ/(m^3 \cdot ^\circ C)$
13	c_{kw}	雾化空气的比热容	
14	c_l	冷却空气的比热容	
15	c_m	气幕用气体的比热容	
16	c_n	窑车耐火衬砖入窑时的比热容	$kJ/(kg \cdot ^\circ C)$
17	c_r	燃料的比热容	$kJ/(kg \cdot ^\circ C)$ 或 $kJ/(m^3 \cdot ^\circ C)$
18	c_u	预热带漏入空气的比热容	$kJ/(m^3 \cdot ^\circ C)$
19	c_v	窑尾直接冷却空气的比热容	$kJ/(m^3 \cdot ^\circ C)$
20	H_w	入炉水的热焓	kJ/kg
21	m_b	匣钵的质量	kg/kg 产品
22	m_z	辅助材料的质量(烧结制品)	
23	m_g	干坯体入窑质量	
24	m_{js}	窑车的金属质量	
25	m_n	窑车耐火衬砖的质量	
26	m_o	坯体中结构水质量	
27	m_q	雾化蒸汽的质量	
28	m_r	燃料消耗量	
29	m_s	坯体入窑质量	

QB/T 1493—1992

表 A1(续)

序 号	符 号	说 明	单 位
收 入 项			
30	m_w	重油乳化水质量	kg/kg 产品
31	m_z	坯体中自由水质量	
32	p_d	大气压强	Pa
33	p_g	余热锅炉的工作压力	
34	p_k	助燃空气管道或入口的动压	
35	p_l	冷却空气动压	
36	p_m	气幕动压	
37	p_w	雾化空气动压	
38	Q	总热收入	kJ/kg 产品
39	Q_b	匣钵带入的显热	
40	Q_{br}	窑具材料带入的显热	
41	Q_c	窑车带入的显热	
42	Q_{dw}	燃料应用基时的低位发热量	kJ/kg 燃料或 kJ/m ³ 燃料
43	Q_f	辅助材料带入的显热	kJ/kg 产品
44	Q_g	干坯体带入的显热	
45	Q_{g0}	供给热	
46	Q_{js}	窑车金属带入的显热	
47	Q_k	助燃空气带入的显热	
48	Q_{kk}	助燃空气和雾化空气带入的显热	
49	Q_l	冷却空气带入的显热	
50	Q_m	气幕带入的显热	
51	Q_n	窑车耐火衬砖带入的显热	
52	Q_q	雾化蒸汽带入的显热	
53	Q_r	燃料燃烧的化学热	
54	Q_s	燃料带入的显热	
55	Q_z	坯体带入的显热	
56	Q_{z1}	预热带漏入空气带入的显热	
57	Q_w	重油乳化用水带入的显热	
58	Q_z	坯体中自由水带入的显热	
59	t_k	急冷空气入窑的温度	℃
60	t_b	匣钵入窑温度	
61	t_c	车下冷空气入窑温度	
62	t_f	辅助材料入窑的温度	

QB/T 1493—1992

表 A1(续)

序 号	符 号	说 明	单 位
收 入 项			
63	t_j	间接冷却空气入窑温度	℃
64	t_{js}	窑车金属入窑的温度	
65	t_k	助燃空气入窑的温度	
66	t_{kw}	雾化空气入窑的温度	
67	t_l	冷却空气入窑的温度	
68	t_m	气幕用气体入窑温度	
69	t_n	窑车耐火衬砖入窑的温度	
70	t_o	周围空气的温度	
71	t_q	雾化蒸汽入窑的温度	
72	t_r	燃料入窑的温度	
73	t_s	坯体入窑的温度	
74	t_u	预热带漏入空气的温度	
75	t_w	入炉水及重油乳化用水温度	
76	t_y	窑尾直接冷却空气入窑的温度	
77	V_a	急冷空气送入量	m ³ /kg 产品
78	V_c	车下冷却空气送入量	
79	V_j	间接冷却空气送入量	
80	V_k^0	理论空气量	m ³ /kg 燃料或 m ³ /m ³ 燃料
81	V_k	助燃空气量	m ³ /kg 产品
82	V_{kw}	雾化空气量	
83	V_l	冷却空气入窑量	
84	V_m	气幕用气体量	
85	V_u	预热带漏入空气量	
86	V_y	窑尾直接冷却空气送入量	
87	W_a	干坯体中氧化铝的质量分数	%
88	W_c	干坯体中氧化钙的质量分数	
89	W_s	煤中灰分的质量分数	
90	W_m	干坯体中氧化镁的质量分数	
91	W_r	燃料含水率	
92	W_s	坯体入窑相对平均含水率	
93	ω_k	助燃空气流速	m/s
94	ω_l	冷却空气流速	
95	ω_m	气幕用气体流速	
96	ω_w	雾化空气流速	

QB/T 1493—1992

表 A1(续)

序 号	符 号	说 明	单 位
支 出 项			
97	A_{dt}	窑顶各个测区的表面积	m^2
98	A_t	热风的管道截面积	
99	A_i	窑体各个测区的表面积	
100	A_o	孔口辐射面积	
101	A_w	窑墙各个测区的表面积	
102	A_v	烟气的管道截面积	
103	c_o	黑体辐射系数,等于 20.4	$kJ/(h \cdot m^2 K^4)$
104	c'_a	热风的比热容	$kJ/(m^3 \cdot ^\circ C)$
105	c'_b	匣钵出窑时的比热容	$kJ/(kg \cdot ^\circ C)$
106	c'_c	车下抽热风的比热容	$kJ/(m^3 \cdot ^\circ C)$
107	c'_d	辅助材料出窑时的平均比热容	$kJ/(kg \cdot ^\circ C)$
108	c_i	各气体成分平均比热容	$kJ/(m^3 \cdot ^\circ C)$
109	c'_i	间接抽热风的比热容	
110	c'_{ic}	冷却带窑门逸出热气体比热容	
111	c'_{ip}	冷却带排放热气体的比热容	
112	c'_n	窑车耐火衬砖出窑时的比热容	$kJ/(kg \cdot ^\circ C)$
113	c'_p	产品的平均比热容	
114	c'_r	灰渣的比热容	
115	c'_y	干烟气的比热容	$kJ/(m^3 \cdot ^\circ C)$
116	c'_z	直接抽热风的平均比热容	
117	H'_q	出炉蒸汽热焓	kJ/kg
118	m'_t	产品小时质量	kg/h
119	m'_l	干坯体烧失减量	kg/kg 产品
120	m'_p	出窑产品质量,按 1 kg 计	kg
121	m'_r	灰渣的质量	kg/kg 产品
122	m'_n	燃料燃烧生成水质量	
123	m'_w	余热锅炉水的蒸发量	
124	p_t	抽出热风动压	Pa
125	p_g	余热锅炉压力	
126	p_y	烟气动压	
127	Q'	总热支出	kJ/kg 产品
128	Q'_b	匣钵带出的显热	
129	Q'_{bt}	窑具材料带出的显热	
130	Q'_o	窑车带出的显热	

QB/T 1493—1992

表 A1(续)

序 号	符 号	说 明	单 位
支 出 项			
131	Q'_{dr}	窑顶表面散热损失	kJ/kg 产品
132	Q'_f	辅助材料带出的显热	
133	Q'_h	坯体烧成过程物理化学反应耗热	
134	Q'_{hb}	化学不完全燃烧热损失	
135	Q'_{jb}	机械不完全燃烧热损失	
136	Q'_s	窑车金属带出的显热	
137	Q'_{jw}	坯体中结构水脱水耗热	
138	Q'_k	抽热风带走的显热	
139	Q'_{kr}	炉口及其孔洞的辐射热损失	
140	Q'_l	冷却带排放窑门逸出气体带出显热	
141	Q'_m	冷却带窑门逸出气体热损失	
142	Q'_{lp}	冷却带排放热气体带出的显热	
143	Q'_m	窑体表面散热损失	
144	Q'_s	窑车耐火衬砖带出的显热	
145	Q'_p	产品带出的显热	
146	Q'_{pw}	坯体水分蒸发和加热水蒸气耗热	
147	Q'_{qm}	窑墙表面散热损失	
148	Q'_r	灰渣带走的显热	
149	Q'_s	烟气中水蒸气带出的显热	
150	Q'_i	其他热损失	
151	Q'_c	余热锅炉水蒸发吸热	W/m ²
152	Q'_s	坯体烧成过程中生成玻璃相耗热	
153	Q'_y	干烟气带走的显热	
154	Q'_z	坯体中自由水分蒸发耗热	
155	q_r	窑体各个测区的平均热流密度	
156	t'_a	抽出热风的温度	
157	t'_b	匣钵出窑温度	
158	t'_c	车下抽热风温度	
159	t_{dr}	窑顶各个测区的表面平均温度	
160	t_{dl}	窑顶左侧测定点的温度	
161	t_{dr}	窑顶右侧测定点的温度	
162	t_{dx}	窑顶中间测定点的温度	
163	t'_f	辅助材料出窑的温度	
164	t'_j	间接抽热风出窑的温度	
165	t'_k	直接抽热风出窑的温度	
166	t'_{kr}	窑口辐射热损失测定点的温度	
167	t'_{lp}	冷却带排放热气体测定点的温度	
168	t'_{pw}	坯体水分蒸发测定点的温度	
169	t'_{qm}	窑墙表面散热测定点的温度	
170	t'_{sk}	窑车耐火衬砖带出显热测定点的温度	

QB/T 1493—1992

表 A1(续)

序 号	符 号	说 明	单 位
支 出 项			
165	t'_{js}	窑车金属出窑的温度	℃
166	t'_{lm}	冷却带窑门逸出热气体温度	
167	t'_{lp}	冷却带排放热气体温度	
168	t'_n	窑车耐火衬砖出窑的温度	
169	t'_p	产品出窑的温度	
170	t_{qp}	窑墙各个测区表面平均温度	
171	t_{qs}	窑墙上部测定点的温度	
172	t_{qx}	窑墙下部测定点的温度	
173	t_{qs}	窑墙中部测定点的温度	
174	t'_r	灰渣的平均温度	
175	t'_r	炉膛内的平均温度	
176	t'_w	出炉蒸汽的温度	
177	t'_y	离窑烟气温度	
178	t'_z	直接抽出热风温度	
179	V'_z	抽出热风量	m ³ /kg 产品
180	V'_c	车下抽出热风量	
181	V'_j	间接抽出热风量	
182	V'_{lm}	冷却带窑门逸出热气体量	
183	V'_{lp}	冷却带排放热气体量	
184	V_y^2	理论烟气体量	m ³ /kg 燃料或 m ³ /m ³ 燃料
185	V'_y	离窑干烟气体量	
186	V'_z	直接抽出热风量	m ³ /kg 产品
187	W_l	灰渣中含碳率	%
188	W_x	产品中玻璃相的质量分数	
189	x_{co}	干烟气中一氧化碳体积分数	
190	x_i	燃料或烟气中各种气体体积分数	
191	x_o	烟气中氧气体积分数	
192	α_{di}	第 i 段窑顶面对空气综合传热系数	kJ/(m ² ·h·℃)
193	α_{qi}	第 i 段窑墙面对空气综合传热系数	
194	α_s	烧成带平均空气过剩系数	
195	α_y	排出烟气中的空气过剩系数	
196	ϵ	窑体外表面的黑度	
197	ϕ	门孔系数	
198	ω_r	抽出热风流速	m/s

QB/T 1493—1992

表 A1(续)

序 号	符 号	说 明	单 位
支 出 项			
199	ω_y	烟气流速	m/s
热 效 率 项			
200	c_{bg}	匣钵最高烧成温度时比热	kJ/(kg·℃)
201	c_{tg}	辅助材料最高烧成温度时比热	
202	c_{yc}	出余热利用装置烟气平均比热容	kJ/(m³·℃)
203	c_{yj}	进余热利用装置烟气平均比热容	
204	Q_{bg}	匣钵加热到最高烧成温度时耗热	kJ/kg 产品
205	Q_d	单位产品的烧成能耗	
206	Q_{tg}	辅助材料加热到最高烧成温度时耗热	
207	Q'_g	产品烧成至最高烧成温度时耗热	
208	Q_{ig}	窑具材料加热到最高烧成温度时耗热	
209	Q_{py}	烧成产品的有效热	
210	Q'_q	坯体水分蒸发和加热水蒸气净耗热	
211	Q_{xy}	含窑具材料在内的有效热	
212	Q_{yy}	烟气中已利用的显热	℃
213	t'_g	最高烧成温度	
214	t_{yc}	烟气出余热利用装置的温度	
215	t_{yj}	烟气进余热利用装置的温度	m³/kg 产品
216	V_{yj}	进余热利用装置烟气体积	
217	η_h	余热资源回收率	%
218	η_l	余热利用率	
219	η_p	烧成产品的窑炉热效率	
220	η_x	含窑具材料在内的窑炉热效率	
221	η_k	窑炉的综合热效率	
222	η_{zs}	余热资源率	

附 录 B
记录、测定事项一览表
(补充件)

表 B1 隧道窑基本情况记录表

厂 名	
厂 址	
窑炉类型	
燃料种类	

QB/T 1493—1992

表 B1(完)

项 目			单 位	数 值	备 注	
产 品	品 种					
	规格型号					
	产量 m^3		kg/h			
窑 炉 基 本 结 构	窑	全长	m			
		预热带(长×宽×高)				
		烧成带(长×宽×高)				
		冷却带(长×宽×高)				
	体	窑内容车数	台			
		排烟孔对数	对			
		排烟孔尺寸(长×高)	m			
		进车速度	m/h			
		烧成周期	h			
	燃 烧 室	对数	对			
		规格(长×宽×高)	m			
		型号				
		容量	m^3/h			
	风 烟 系 统	风 机	型号			铭牌值
			容量	m^3/h		
			风压	Pa		
			型号			铭牌值
			容量	m^3/h		
			风压	Pa		
			型号			铭牌值
			容量	m^3/h		
			风压	Pa		
		烟囱大小(内径×高)		m		
	余热 利用 设备	种类				
		型号				
		容量	m^3/h			
	隧道窑结构现状及历史					
	窑内断面温差情况及产品烧成质量情况					
	烧成带气氛要求					
	烟气带走热占总能耗分数					
燃烧调节方式						

QB/T 1493—1992

表 B2 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_t	%			
		密度 d_{15}^{15}	kg/m ³			
	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 Q_{bw}		kJ/kg 燃料或 kJ/m ³ 燃料			
	燃料的消耗量 m_r		kg/kg 产品或 m ³ /kg 产品			
	燃料入窑的温度 t_r		℃			
燃 烧 用 空 气 量	烧成带的平均空气过剩系数 α_s					
	理论空气量 V_t^0		m ³ /m ³ 燃料或 m ³ /kg 燃料			
	雾化空气管道截面积 A_w		m ²			
	动压 p_w		Pa			
	流速 ω_w		m/s			
	雾化空气量 V_{kw}		m ³ /kg 产品			
	雾化空气入窑温度 t_{kw}		℃			
	助燃空气入窑温度 t_k					
	雾化蒸汽温度 t_q					
雾化蒸汽流量 V_q		m ³ /kg 产品				
气 幕	气幕的管道截面积 A_m		m ²			
	动压 p_m		Pa			
	流速 ω_m		m/s			
	气幕量 V_m		m ³ /kg 产品			
	温度 t_m		℃			

QB/T 1493—1992

表 B2(续)

测 定 项 目			单 位	数 据	
漏入空气	预热带漏入空气量 V_0		m^3/kg 产品		
	预热带漏入空气的温度 t_0		$^{\circ}\text{C}$		
冷却空气	冷却空气的管道截面积 A_1		m^2		
	动压 p_1		Pa		
	流速 ω_1		m/s		
	冷却空气量 V_1		m^3/kg 产品		
	温度 t_1		$^{\circ}\text{C}$		
抽热风	热风的管道截面积 A_2		m^2		
	动压 p_2		Pa		
	流速 ω_2		m/s		
	抽出热风量 V_2		m^3/kg 产品		
	热风温度 t_2'		$^{\circ}\text{C}$		
坯体	坯体化学组成	SiO_2	%		
		Al_2O_3			
		Fe_2O_3			
		CaO			
		MgO			
		K_2O			
		Na_2O			
	水分	坯体入窑相对平均含水率 W_s			
		干坯体结构水质量 m_0	kg/kg 产品		
坯体入窑的温度 t_s		$^{\circ}\text{C}$			
产品	产品中玻璃相质量分数 W_g		%		
窑车	窑内容纳车数		台		
	每千克产品窑车质量	金属 m_m	kg/kg 产品		
		耐火衬砖 m_n			
	温度	入窑处	金属 t_m	$^{\circ}\text{C}$	
			耐火衬砖 t_n		
		出窑处	金属 t_m'		
			耐火衬砖 t_n'		
	产品	产品最高烧成温度 t_s'		$^{\circ}\text{C}$	
产品出窑温度 t_p'					

QB/T 1493—1992

表 B2(续)

测 定 项 目				单 位	数 据
匣 体 辅 助 材 料	质量	匣钵 m_b		kg/kg 产品	
		辅助材料 m_f			
	温 度	入 窑 处	匣钵 t_b	℃	
			辅助材料 t_f		
		出 窑 处	匣钵 t'_b		
			辅助材料 t'_f		
烟 气	主烟 道处 烟气 组成		CO	%	
			O ₂		
			CO ₂		
			N ₂		
			排出烟气中空气过剩系数 α_y		
	烟气管道截面积 A_y		m ²		
	动压 p_y		Pa		
	流速 ω_y		m/s		
	理论烟气体积 V_y^0		m ³ /kg 燃料或 m ³ /m ³ 燃料		
	离窑干烟气体积 V_y'				
	离窑烟气的温度 t'_y		℃		
	灰 渣	灰渣质量 m'_f		kg/kg 产品	
煤中灰分质量分数 W_A		%			
灰渣中含碳率 W_C					
灰渣的平均温度 t'_f		℃			
窑 体	窑 墙	测定区域段			
		各个测区表面积 A_w		m ²	
		各个测区表面平均温度 t_{qi}		℃	
	窑 顶	测定区域段			
		各个测区表面积 A_d		m ²	
		各个测区表面平均温度 t_{di}		℃	
	测定区域段				
	各个测区表面积 A_i		m ²		
	各个测区平均热流密度 q_i		W/m ²		
	孔口辐射面积 A_0		m ²		
	孔口尺寸与窑墙厚度比		%		
	炉膛内温度 t'_i		℃		

QB/T 1493—1992

表 B2(完)

测 定 项 目		单 位	数 据
余 热 锅 炉	水的蒸发量 m_w'	kg/kg 产品	
	工作压力 p_g	Pa	
	入炉水的温度 t_w	℃	
	出炉蒸汽的温度 t_w'		
	入炉水的热焓 H_w	kJ/kg	
	出炉蒸汽的热焓 H_w'		
余 热 利 用	抽出热风温度 t_c'	℃	
	抽出热风量 V_c'	m ³ /kg 产品	
	烟气进余热利用装置温度 t_{y1}	℃	
	烟气出余热利用装置温度 t_{y2}		
	进余热利用装置烟气体积 V_{y1}	m ³ /kg 产品	

表 B3 窑炉热效率计算综合表

项 目		单 位	数 值
有 效 热	坯体水分蒸发并加热到离窑烟气温度时净耗热 Q_1'	kJ/kg 产品	
	坯体烧成过程中物理化学反应耗热 Q_2'		
	坯体烧成过程生成玻璃相耗热 Q_3'		
	坯体烧成至最高烧成温度时的耗热 Q_4'		
	窑具材料加热到最高烧成温度时耗热 Q_{k1}		
燃料供给热 Q_{d1}			
余 热 利 用	热风带走显热 Q_5'		
	烟气带走显热 Q_6'		
	烟气中已被利用的显热 Q_{y2}		
	余热锅炉水分蒸发吸热 Q_w'		
效 率	余热资源率 η_r	%	
	余热利用率 η_l		
	余热资源回收率 η_h		
	烧成产品的窑炉热效率 η_p		
	含窑具材料在内的窑炉热效率 η_s		
	窑炉综合热效率 η_c		
单位产品烧成能耗 Q_d		kJ/kg 产品	

QB/T 1493—1992

附 录 C
燃料低位发热量的计算
(补充件)

C1 液体燃料

C1.1 已知燃料的元素分析时

$$Q_{\text{dw}}^y = 339C^y + 1\,030H^y - 109(O^y - S^y) - 25W^y \quad \dots\dots\dots(\text{C1})$$

式中： C^y 、 H^y 、 O^y 、 S^y 、 W^y ——分别表示应用基时燃料中碳、氢、氧、硫及水的分数。

C1.2 已知重油的密度时，可查表 C1 得到重油的低位发热量。

表 C1 重油密度和低位发热量的关系

密度 $d_{15}^{\text{油}}$	低位发热量 Q_{dw} , kJ/kg 燃料	密度 $d_{15}^{\text{油}}$	低位发热量 Q_{dw} , kJ/kg 燃料
1.076 0	39 599.8	0.959 3	41 314.2
1.067 9	39 725.2	0.952 9	41 397.8
1.059 9	39 850.6	0.946 5	41 481.5
1.052 0	39 976.1	0.940 2	41 565.1
1.044 3	40 101.5	0.934 0	41 648.7
1.033 6	40 227.0	0.927 4	41 732.4
1.029 1	40 352.4	0.921 8	41 816.0
1.021 7	40 436.1	0.915 9	41 899.6
1.014 3	40 519.7	0.910 0	41 983.3
1.007 1	40 645.2	0.904 2	42 025.1
1.000 0	40 728.8	0.893 4	42 108.7
0.993 0	40 854.2	0.892 7	42 192.3
0.986 1	40 937.9	0.887 1	42 276.0
0.979 2	41 021.5	0.881 6	42 317.8
0.972 5	41 146.9	0.876 2	42 401.4
0.965 9	41 230.6		

注： $d_{15}^{\text{油}}$ 为 15℃时重油的密度与 15℃时水的密度之比。

C1.3 除根据燃料的组成计算外，还可以采用量热计法测定燃料的低位发热量。此方法比较精确，可参照 GB/T 384 进行测试和计算。

C2 固体燃料

C2.1 已知煤的元素分析时

C2.1.1 无烟煤($V^y \leq 10\%$)

$$Q_{\text{dw}}^y = 335(327)C^y + 1\,300(1\,260)H^y + 63S^y + 105O^y - 21(A^s - 10) \quad \dots\dots\dots(\text{C2})$$

式中： Q_{dw}^y ——可燃基时燃料高位发热量，kJ/kg 燃料；

C^y 、 H^y 、 O^y 、 S^y 、 V^y ——分别表示可燃基时燃料中碳、氢、氧、硫、挥发的分数；

A^s ——干燥基时燃料中灰分的分数。

QB/T 1493—1992

注：① 系数的选用说明

a. C^r 系数的选用

$C^r \geq 95\%$ 、 $H^r \leq 1.5\%$ 时， C^r 前系数用括弧中的 327；

$C^r < 95\%$ 、 $H^r > 1.5\%$ 时， C^r 前系数用括弧外的 335。

b. H^r 系数的选用

$C^r \leq 77\%$ 时， H^r 前系数用括弧中的 1 260；

$C^r > 77\%$ 时， H^r 前系数用括弧外的 1 300。

② 当 $A^s \leq 10\%$ 时，公式中的最后一项“ $-21(A^s - 10)$ ”可不计算。

C2.1.2 烟煤 ($V^r > 20\%$)

$$Q_{Gw}^r = 335C^r + 1\,300H^r + 92S^r - 109O^r - 17(A^s - 10) \quad \dots\dots\dots (C3)$$

注：当 $A^s \leq 10\%$ 时，公式中的最后一项“ $-17(A^s - 10)$ ”可不计算。

C2.1.3 褐煤 ($V^r > 37\%$)

$$Q_{Gw}^r = 335C^r + 1\,280H^r + 92S^r - 109O^r - 25(A^s - 10) \quad \dots\dots\dots (C4)$$

注：当 $A^s \leq 10\%$ 时，公式中的最后一项“ $-25(A^s - 10)$ ”可不计算。

C2.1.4 由可燃基高位发热量换算为应用基高位发热量，其换算系数见表 C2。

$$Q_{Gw}^r = Q_{Gw}^s \times [100 - (W^y + A^y)]/100 \quad \dots\dots\dots (C5)$$

式中： Q_{Gw}^r ——应用基时燃料的高位发热量，kJ/kg 燃料；

W^y 、 A^y ——分别表示应用基时燃料中水分、灰分的分数。

C2.1.5 由应用基高位发热量换算为应用基低位发热量，其换算公式为：

$$Q_{bw}^r = Q_{Gw}^r - 225H^y - 25W^y \quad \dots\dots\dots (C6)$$

式中： H^y ——应用基时燃料中氢的分数。

不同基准时燃料组成的换算系数见表 C2。

表 C2 燃料组成的换算系数¹⁾

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	—	$\frac{100 - W^r}{100 - W^y}$	$\frac{100}{100 - W^y}$	$\frac{100}{100 - (W^y + A^y)}$
分析基	$\frac{100 - W^y}{100 - W^r}$	—	$\frac{100}{100 - W^r}$	$\frac{100}{100 - (W^r + A^r)}$
干燥基	$\frac{100 - W^y}{100}$	$\frac{100 - W^r}{100}$	—	$\frac{100}{100 - A^s}$
可燃基	$\frac{100 - (W^y + A^y)}{100}$	$\frac{100 - (W^r + A^r)}{100}$	$\frac{100 - A^s}{100}$	—

注：1) 适用于除水分以外的各种成分及高位发热量的换算。

C2.2 已知煤的工业分析时

C2.2.1 无烟煤

$$Q_{bw}^l = K_0 - 360W^l - 385A^l - 100V^l \quad \dots\dots\dots (C7)$$

式中： Q_{bw}^l ——分析基时燃料的低位发热量，kJ/kg 燃料；

W^l 、 A^l 、 V^l ——分别表示分析基时燃料中水分、灰分及挥发分的分数；

K_0 ——系数，根据 V^r 值从表 C3 中查出， V^r 与 V^l 的换算按照表 C2 的关系式计算。

表 C3 K_0 与 V^r 的关系

$V^r, \%$	≤ 2.5	$> 2.5 \sim 5.0$	$> 5.0 \sim 7.5$	$> 7.5 \sim 10.0$
K_0	34 300	34 800	35 200	35 600

QB/T 1493—1992

C2.2.2 烟煤

$$Q'_{\text{bw}} = 100K_1(K_1 + 25.12)(W^f + A^f) - 12.56V^f - 167.5W^{(1)} \dots\dots\dots(\text{C8})$$

式中: K_1 ——系数,随 V^f 及焦渣特征而变化,可从表 C4 中查出。 V^f 与 V^f 的换算按照表 C2 的关系式计算。

注: 1) 只在 $V^f < 35\%$, $W^f > 3\%$ 时减去此项。

表 C4 K_1 与 V^f 及焦渣特征的关系

$K_1 \backslash V^f, \%$	10~13.5	>13.5~17	>17~20	>20~23	>23~29	>29~32	>32~35	>35~38	>38~42	>42
焦渣特征										
1	352	337	335	329	320	320	306	306	306	304
2	352	350	343	339	329	327	325	320	316	312
3	354	354	350	345	339	335	331	329	327	320
4	354	356	352	348	343	339	335	333	331	325
5~6	354	356	356	352	350	345	341	339	335	333
7	354	356	356	356	354	352	348	345	343	339
8	354	356	356	358	356	354	350	348	345	343

注: 焦渣特征——测定挥发分时所残留的焦渣外形特征,分八类。

1. 粉态; 2. 粘着; 3. 弱粘着; 4. 不熔融粘结; 5. 不膨胀熔融粘结; 6. 微膨胀熔融粘结; 7. 膨胀熔融粘结; 8. 强膨胀熔融粘结。

C2.2.3 褐煤

$$Q'_{\text{bw}} = 100K_2 - (K_2 + 25.12)(W^f + A^f) - V^f \dots\dots\dots(\text{C9})$$

式中: K_2 ——系数,根据 V^f 值从表 C5 中查出。 V^f 与 V^f 换算按表 C2 的关系式计算。

表 C5 我国褐煤的 V^f 和 K_2 对应表

$V^f, \%$	>38~45	>45~49	>49~56	>56~62	>62
K_2	287	281	272	264	258

C2.2.4 由分析基低位发热量换算为应用基低位发热量,其换算公式为:

$$Q'_{\text{bw}} = Q_{\text{bw}} \times (100 - W^y)/(100 - W^f) - 25.12[W^y - W^f \times (100 - W^y)/(100 - W^f)] \dots\dots\dots(\text{C10})$$

C3 气体燃料

已知各可燃组成的分数时:

$$Q_{\text{bw}} = 126\text{CO} + 108\text{H}_2 + 358\text{CH}_4 + 590\text{C}_2\text{H}_4 + 637\text{C}_2\text{H}_6 + 806\text{C}_3\text{H}_8 \\ + 912\text{C}_3\text{H}_8 + 1\,187\text{C}_4\text{H}_{10} + 1\,460\text{C}_5\text{H}_{12} + 232\text{H}_2\text{S} \dots\dots\dots(\text{C11})$$

式中: Q_{bw} ——气体燃料的低位发热量, kJ/m^3 燃料;

CO 、 H_2 、 CH_4 、 C_2H_4 、 C_2H_6 、 C_3H_8 、 C_3H_8 、 C_4H_{10} 、 C_5H_{12} 、 H_2S ——气体燃料中各可燃组成分数。

附录 D

燃料燃烧理论空气量与理论烟气量
及燃烧生成水质量和生成干烟气量计算
(补充件)

D1 燃料燃烧理论空气量与理论烟气量的近似计算

D1.1 固体燃料燃烧理论空气量 $V_k^0, \text{m}^3/\text{kg}$ 燃料; 理论烟气量 $V_y^0, \text{m}^3/\text{kg}$ 燃料的近似计算

$$V_k^0 = (0.241Q_{\text{dw}}^0/1000) + 0.5 \quad \dots\dots\dots(\text{D1})$$

$$V_y^0 = (0.213Q_{\text{dw}}^0/1000) + 1.65 \quad \dots\dots\dots(\text{D2})$$

D1.2 液体燃料燃烧理论空气量 $V_k^0, \text{m}^3/\text{kg}$ 燃料; 理论烟气量 $V_y^0, \text{m}^3/\text{kg}$ 燃料的近似计算

$$V_k^0 = (0.203Q_{\text{dw}}^0/1000) + 2 \quad \dots\dots\dots(\text{D3})$$

$$V_y^0 = 0.265Q_{\text{dw}}^0/1000 \quad \dots\dots\dots(\text{D4})$$

D1.3 气体燃料燃烧理论空气量 $V_k^0, \text{m}^3/\text{m}^3$ 燃料; 理论烟气量 $V_y^0, \text{m}^3/\text{m}^3$ 燃料的近似计算D1.3.1 当 $Q_{\text{dw}} < 12\,500 \text{ kJ}/\text{m}^3$ 燃料时

$$V_k^0 = 0.209Q_{\text{dw}}/1000 \quad \dots\dots\dots(\text{D5})$$

$$V_y^0 = (0.173Q_{\text{dw}}/1000) + 1 \quad \dots\dots\dots(\text{D6})$$

D1.3.2 当 $Q_{\text{dw}} > 12\,500 \text{ kJ}/\text{m}^3$ 燃料时

$$V_k^0 = (0.26Q_{\text{dw}}/1000) - 0.25 \quad \dots\dots\dots(\text{D7})$$

$$V_y^0 = (0.272Q_{\text{dw}}/1000) + 0.25 \quad \dots\dots\dots(\text{D8})$$

D2 每千克或每标准立方米燃料燃烧生成的水质量计算

D2.1 每千克固体、液体燃料燃烧生成的水质量, kg/kg 燃料

$$m = (W + 9H)/100 \quad \dots\dots\dots(\text{D9})$$

式中: W ——燃料中含水率, %;

H ——燃料中氢的质量分数, %。

D2.2 每标准立方米气体燃料燃烧生成的水质量, kg/m^3

$$m = \frac{18}{22.4}(H_2 + 2CH_4 + \frac{n}{2}C_mH_n + H_2S + H_2O) \frac{1}{100} \quad \dots\dots\dots(\text{D10})$$

式中: $H_2, CH_4, C_mH_n, H_2S, H_2O$ ——分别表示燃料中各相应成分体积分数。

注: 固体、液体、气体燃料的成分可查有关资料或手册。

D3 每千克或每标准立方米燃料燃烧生成干烟气量计算

D3.1 每千克固体、液体燃料燃烧生成干烟气量, m^3/kg 燃料

$$V_y' = V_s - \frac{22.4}{18}(W + 9H) \frac{1}{100} \quad \dots\dots\dots(\text{D11})$$

式中: V_s ——实际生成烟气量, m^3/kg 燃料。

$$V_s = [V_y^0 + (\alpha_y - 1)V_k^0]$$

式中: α_y ——排出烟气中空气过剩系数。

D3.2 每标准立方米气体燃料燃烧生成干烟气量, m^3/m^3 燃料

$$V_y' = V_s - (H_2 + 2CH_4 + \frac{n}{2}C_mH_n + H_2S + H_2O) \frac{1}{100} \quad \dots\dots\dots(\text{D12})$$

QB/T 1493—1992

附录 E
各类数据表
(参考件)

表 E1 各种煤的平均比热容

kJ/(kg·°C)

种类	V _r , %	比热容	种类	V _r , %	比热容
无烟煤	≤10	0.836	气 煤	>37	1.263
贫 煤	10~20	0.836	长焰煤	>37	1.305
瘦 煤	≤20	1.116	褐 煤	>37	1.422
肥 煤	26~27	1.213	—	—	—

表 E2 未饱和水与过热水蒸气的热力性质表

kJ/kg

绝对压力 Pa(kgf/cm ²)	焓 H / °C	温 度												
		50	60	70	80	90	100	120	140	160	180	200	220	240
4.9×10 ⁴ (0.5)		209.1	250.9	292.7	334.5	2659.9	2679.2	2718.5	2757.3	2796.2	2835.1	2874.0	2913.3	2952.6
9.8×10 ⁴ (1.0)		209.1	250.9	292.7	334.5	376.3	2679.3	2713.4	2753.2	2792.9	2832.2	2871.9	2911.2	2951.0
2.0×10 ⁵ (2.0)		209.1	250.9	292.7	334.5	376.8	418.6	2703.0	2744.8	2785.8	2826.8	2866.9	2907.5	2947.6
3.9×10 ⁵ (4.0)		209.5	250.9	292.7	334.9	376.8	418.6	503.0	588.4	2771.6	2814.6	2857.3	2899.1	2990.5
5.9×10 ⁵ (6.0)		209.5	251.3	293.1	334.9	376.8	419.0	503.0	588.4	2755.7	2802.1	2846.8	2890.3	2933.0
7.8×10 ⁵ (8.0)		209.5	251.3	293.1	334.9	377.2	419.0	503.5	588.8	674.9	2788.7	2836.0	2881.5	2925.5
9.8×10 ⁵ (10.0)		209.9	251.7	293.5	335.4	377.2	419.0	503.5	588.8	674.9	2774.5	2824.3	2871.9	2917.9
11.8×10 ⁵ (12.0)		209.9	251.7	293.5	335.4	377.2	419.4	503.9	588.8	674.9	762.3	2812.5	2862.3	2909.6
13.7×10 ⁵ (14.0)		210.3	251.7	293.5	335.4	377.6	419.4	503.9	589.2	674.9	762.3	2799.6	2851.9	2901.2
15.7×10 ⁵ (16.0)		210.3	252.2	294.0	335.8	377.6	419.8	503.9	589.2	675.3	762.3	851.4	2841.4	2892.4
17.6×10 ⁵ (18.0)		210.3	252.2	294.0	335.8	377.6	419.8	504.3	589.2	675.3	762.7	851.4	2830.1	2883.6
19.6×10 ⁵ (20.0)		210.8	252.6	294.4	336.2	278.0	419.8	504.3	589.6	675.3	762.7	851.4	2818.8	2874.0

表 E3 陶瓷与耐火材料的密度及其比热容经验计算公式

名 称	密度, kg/m ³	比热容, kJ/(kg·°C)
粘土质耐火砖	2 100~2 200	0.836+2.63×10 ⁻⁴ t
陶瓷制品	—	
高铝质耐火砖	2 300~2 750	0.836+2.51×10 ⁻⁴ t
硅 砖	1 900	0.795+3.35×10 ⁻⁴ t
刚玉砖	2 760~3 100	0.795+4.18×10 ⁻⁴ t
镁 砖	2 600	0.941+2.51×10 ⁻⁴ t
莫来石砖	2 200~2 900	0.67+1.26×10 ⁻⁴ t

QB/T 1493—1992

表 E3 (完)

名 称	密度, kg/m ³	比热容, kJ/(kg·℃)
硅线石质砖	2 200~2 600	$0.67+1.67\times 10^{-4}t$
碳化硅砖	2 400	$0.962+1.46\times 10^{-4}t$
轻质高铝砖	800~1 300	$0.84+2.6\times 10^{-4}t$
轻质粘土砖	400~1 200	$0.85+2.6\times 10^{-4}t$
轻质硅砖	1 100~1 200	$0.8+3.34\times 10^{-4}t$
珍珠岩	400	$0.093+1.4\times 10^{-4}t$
硅藻土砖	550~650	$0.406+0.836\times 10^{-4}t$
膨胀蛭石	100~300	0.752 7(550℃时)
硅酸铝纤维毡	10~130	$0.8+2.93\times 10^{-4}t$
矿渣棉	300	0.89
普通粘土砖	1 700~1 800	0.878 1
普通混凝土	2 000~2 200	0.836 3
红砖	1 800~1 900	$0.84+2.6\times 10^{-4}t$
钢材	7 700~7 900	0.460 0

注: t 为各种材料的使用温度, ℃。

表 E4 各种气体的平均比热容

kJ/(m³·℃)

温度, ℃	CO ₂	H ₂ O	空气	CO	N ₂	O ₂	H ₂	SO ₂	H ₂ S	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	CH ₄	C ₃ H ₆	C ₄ H ₈	C ₆ H ₆	C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂
0	1.6183	1.4886	1.3005	1.3005	1.2963	1.3005	1.2670	1.7330	1.264	1.716	1.871	1.566	2.178	3.069	3.831	4.207	5.212
100	1.7186	1.5012	1.3047	1.3047	1.3005	1.3130	1.2921	1.8190	1.541	2.106	2.047	1.658	2.504	3.140	4.295	4.752	5.924
200	1.8065	1.5179	1.3088	1.3088	1.3005	1.3339	1.2963	1.8943	1.574	2.328	2.185	1.767	2.797	3.533	4.743	5.233	6.631
300	1.8817	1.5388	1.3172	1.3172	1.3088	1.3548	1.3005	1.9612	1.608	2.529	2.290	1.892	3.077	4.400	5.162	5.715	7.293
400	1.9528	1.5597	1.3297	1.3297	1.3172	1.3767	1.3005	2.0239	1.645	2.721	2.370	2.022	3.337	4.798	5.564	6.196	7.929
500	2.0155	1.5848	1.3423	1.3423	1.3297	1.3967	1.3088	2.0741	1.683	2.893	2.437	2.144	3.571	5.129	5.916	6.627	8.474
600	2.0657	1.6099	1.3548	1.3590	1.3381	1.4176	1.3088	2.1159	1.721	3.048	2.508	2.269	3.806	5.455	6.271	7.058	9.022
700	2.1159	1.6350	1.3716	1.3716	1.3548	1.4343	1.3130	2.1535	1.759	3.190	2.575	2.357	4.015	5.769	6.589	7.452	9.319
800	2.1577	1.6601	1.3841	1.3883	1.3674	1.4510	1.3172	2.1870	1.796	3.341	2.629	2.470	4.207	6.041	6.887	7.812	9.901
900	2.1953	1.6852	1.3967	1.4008	1.3757	1.4686	1.3241	2.2126	1.830	3.450	2.684	2.569	4.379	6.305	7.159	8.139	10.265
1000	2.2288	1.7145	1.4092	1.4134	1.3083	1.4761	1.3297	2.2288	1.863	3.567	2.734	2.709	4.542	6.523	7.410	8.444	10.600

表 E5 常用气体的密度

kg/m³

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

QB/T 1493—1992

表 E5 (完)			kg/m ³
名 称	化 学 式	密度, ρ_0	
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 E6 煤灰渣的平均比热容

温度, °C	比热容, kJ/(kg · °C)
100	0.795
200	0.836
300	0.865
400	0.890
500	0.920
600	0.941
700	0.949
800	0.962
900	0.979
1 000	1.004
1 100	1.045
1 200	1.129
1 400	1.271

表 E7 各种材料的黑度和辐射系数的平均值

材 料 名 称	黑 度	辐 射 系 数
黑体	1	20.40
耐火砖(新的)	0.78	15.91
耐火砖(用过的)	0.84	17.14
红砖	0.91	18.56
锻铁(已生锈)	0.85	17.34
锻铁(涂铝)	0.50	10.20
锻铁(光亮)	0.45	9.18
铁板(已生锈)	0.67	13.67
钢板(有氧化层)	0.79	16.12
铸铁(铸面平滑)	0.79	16.12
铸铁(已氧化)	0.89	18.16

QB/T 1493—1992

表 E8 饱和水与饱和蒸汽热力性质表

热力性质	温度, °C		80	90	100	120	140	160	180	200	220	240
	压力 ($\times 10^5$ Pa)		0.473	0.701	1.013	1.984	3.611	6.177	10.020	15.538	23.183	33.455
	比容	液体 ($\times 10^{-3}$ m ³ /kg)	1.0292	1.0361	1.0437	1.0606	1.0801	1.1022	1.1275	1.1565	1.1900	1.2291
		蒸汽 (m ³ /kg)	3.4104	2.3624	1.6738	0.8920	0.5088	0.3069	0.1938	0.1271	0.0860	0.0596
	热焓	液体 ($\times 10^2$ kJ/kg)	3.3492	3.7694	4.1906	5.0370	5.8910	6.7550	7.6310	8.5240	9.4370	10.3760
		蒸汽 ($\times 10^3$ kJ/kg)	2.6438	2.6603	2.6793	2.7066	2.7340	2.7577	2.7771	2.7914	2.7999	2.8016

附录 F

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	0~1 600°C	$\leq 600^\circ\text{C}$ 时, $\pm 3^\circ\text{C}$ $> 600^\circ\text{C}$ 时, $\pm 0.005 t$
2	镍铬-镍硅热电偶	WRNZ-328	0~1 000°C	$\leq 400^\circ\text{C}$ 时, $\pm 4^\circ\text{C}$ $> 400^\circ\text{C}$ 时, $\pm 0.0075 t$
3	镍铬-考铜热电偶	WREZ-328	0~600°C	$\leq 300^\circ\text{C}$ 时, $\pm 4^\circ\text{C}$ $> 300^\circ\text{C}$ 时, $\pm 0.1 t$
4	表面温度计	WREU-890M	0~300°C 0~600°C	$< 0.04 t$
5	热流计	NWX-2	温度: $-40\sim 200^\circ\text{C}$	$< 0.05 t$
			热流: $0\sim 8\,000\sim 80\,000\text{ kJ}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$	—
6	热球式电风速计	QDF-2A	0.05~10 m/s	0.05~2 m/s 时 $< \pm 0.1 \omega$
		QDF-3	0.05~30 m/s	2~30 m/s 时 $< \pm 0.05 \omega$
7	高温风速计	6161	温度: $0\sim 500^\circ\text{C}$	$0.01 t \pm 1^\circ\text{C}$
			速度 $0\sim 10\text{ m/s}$ $0\sim 50\text{ m/s}$	$\leq \pm 0.1 \omega$ $\leq \pm 0.05 \omega$
8	补偿式微压计	YJB-150	0~1 500 Pa	$< 1.2\text{ Pa}$
9	倾斜式压力计	2Y-200	0~2 000 Pa	1 级
10	奥氏气体分析仪	—	—	—

注: ① t 为被测物质的温度, °C。② ω 为被测物质的流速, m/s。

附 录 G
测定气体流量时测点的选择与计算方法
(参考件)

G1 测点的选择

G1.1 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 G1 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。

从管中心到各测点的距离可按式(G1)计算:

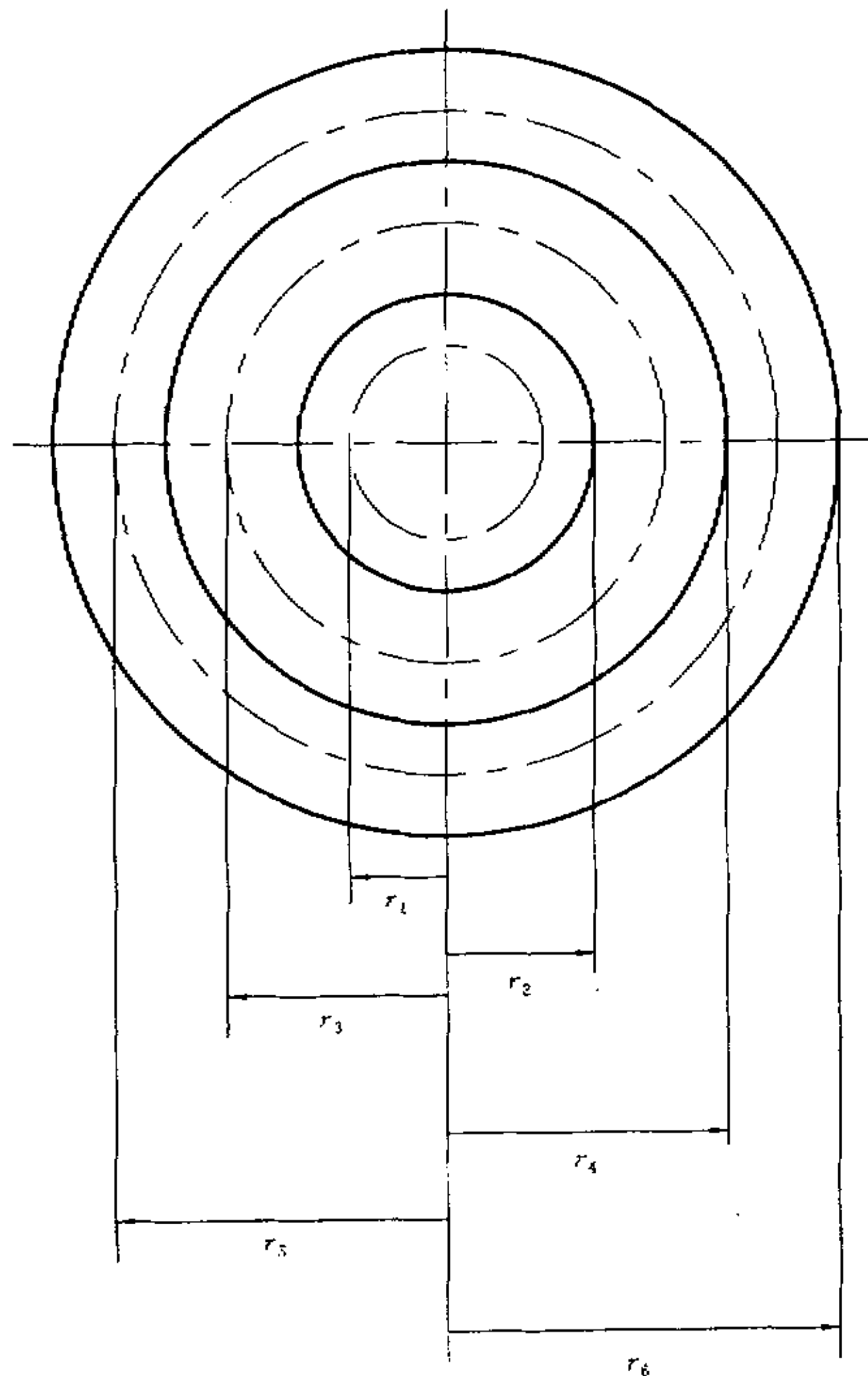


图 G1 圆形截面测点分布图

$$r_{2n-1} = D/2 \times \sqrt{(2n-1)/2N} \quad \dots\dots\dots (G1)$$

式中: D ——管道内径,mm;

n ——从管中心算起的等面积同心圆环的序号;

QB/T 1493—1992

N ——等面积圆环数；

r_{2n-1} ——第 n 个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 G1 确定。

表 G1 圆环数及测点数的选择

管道直径 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

测点的计算很麻烦, 为了使用方便起见, 将已计算好的测点离管壁的距离(以半径的百分比为单位)列入表 G2 中, 使用时将表 G2 中数乘以管道半径, 即为管壁至测点的距离。

表 G2 测点位置计算表

测点编号	圆 环 数 N						
	1	2	3	4	5	6	7
0	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
1	0.293	0.134	0.086	0.064	0.051	0.043	0.036
2	1.707	0.500	0.293	0.210	0.164	0.134	0.114
3	—	1.500	0.591	0.388	0.293	0.236	0.198
4	—	1.866	1.409	0.646	0.457	0.354	0.293
5	—	—	1.707	1.354	0.684	0.500	0.402
6	—	—	1.914	1.612	1.316	0.710	0.537
7	—	—	—	1.790	1.543	1.290	0.733
8	—	—	—	1.936	1.707	1.500	1.267
9	—	—	—	—	1.836	1.646	1.463
10	—	—	—	—	1.949	1.764	1.598
11	—	—	—	—	—	1.866	1.642
12	—	—	—	—	—	1.957	1.707
13	—	—	—	—	—	—	1.886
14	—	—	—	—	—	—	1.964

根据这些计算的数据在皮托管上量好并做上记号, 以便测量时一一对号, 参看图 G2。

G1.2 矩形截面的管道

矩形管道中流量的测量方法可采用等面积小矩形法, 即把它的截面划分为若干个等面积的小矩形, 在每个小矩形对角线的交点上测量流速取平均值。划分方法如图 G3 所示。小矩形的数量取决于管道的边长, 沿管道任一边长均匀分布的小矩形数量(测点排数)一般不应少于表 G3 中所列的数值。

表 G3 矩形管道测点数的选择

矩形管道截面边长, mm	≤ 500	$>500 \sim 1\ 000$	$>1\ 000 \sim 1\ 500$	$>1\ 500 \sim 2\ 000$	$>2\ 000 \sim 2\ 500$	$>2\ 500$
测点排数 N	3	4	5	6	7	8

QB/T 1493—1992

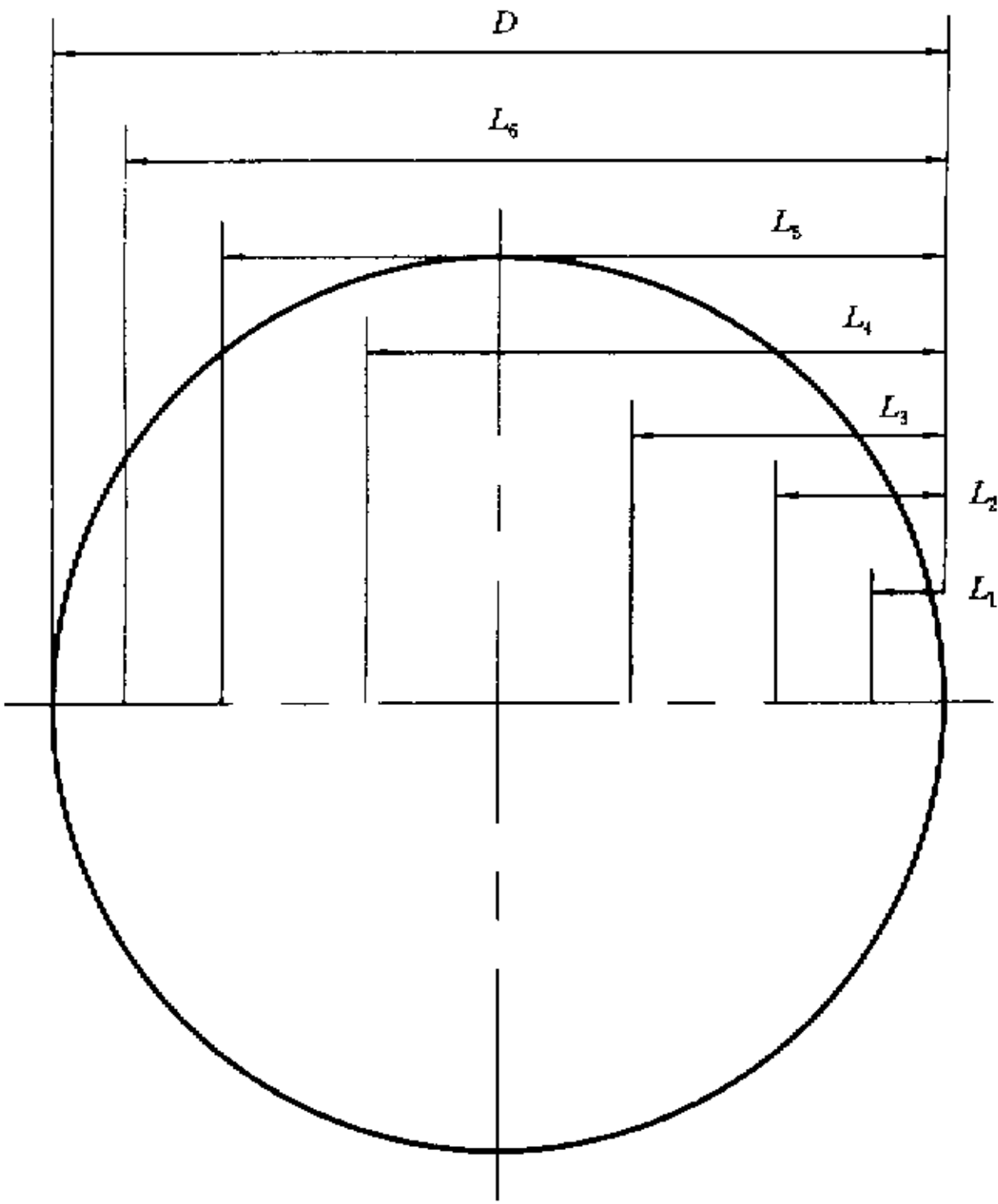


图 G2 圆形管道各测点至管壁距离

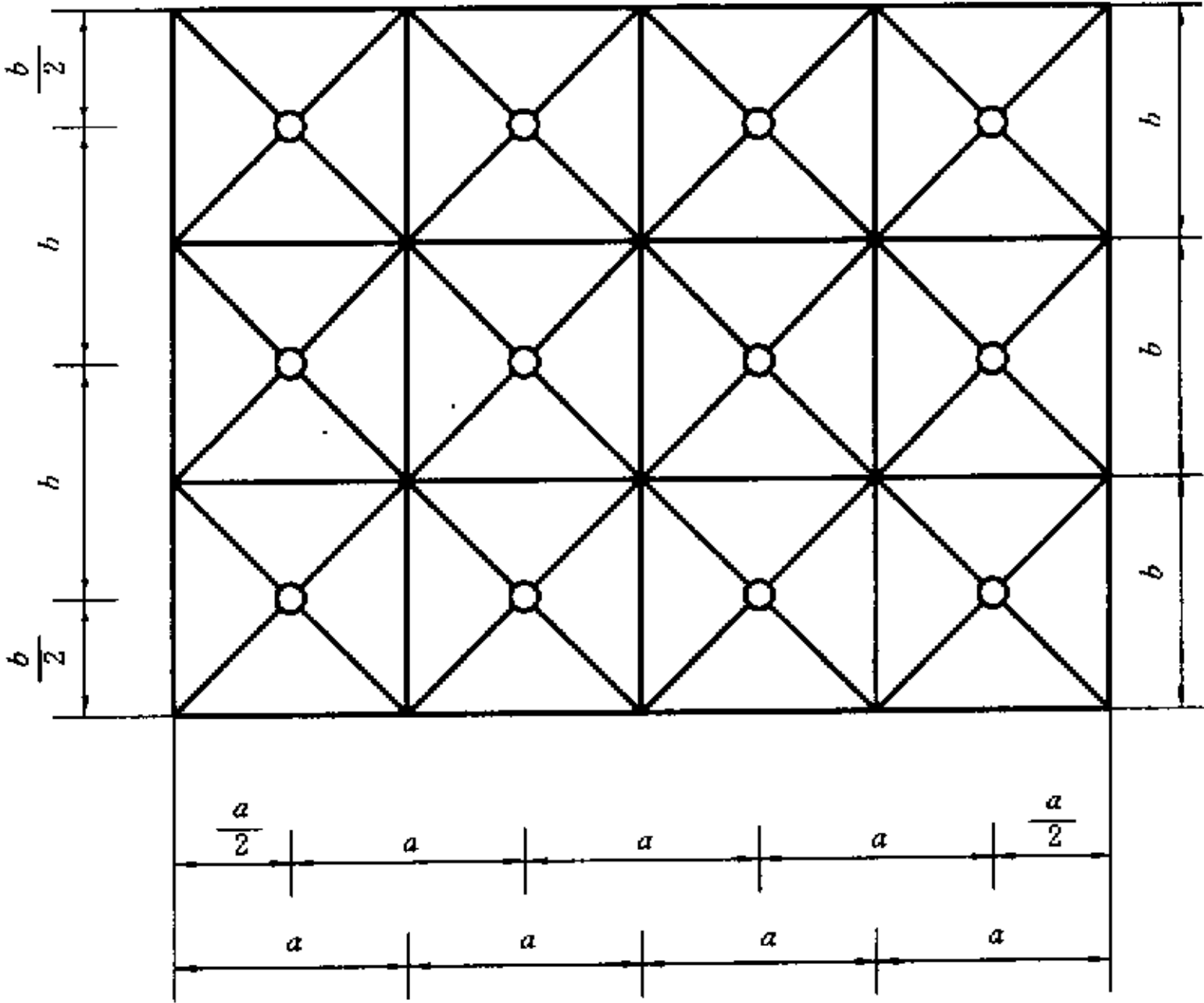


图 G3 矩形截面测点分布图

G2 计算方法

G2.1 气体的平均流速

用毕托管测得截面上各点的动压头,就可以求出流体在各测点的流速 $\omega_1, \omega_2, \omega_3 \dots \omega_n$,然后求得该截面流体的平均流速 ω 。

$$\omega = (\varepsilon/n) \sqrt{(2/\rho_t)} (\sqrt{p_1} + \sqrt{p_2} + \sqrt{p_3} + \dots + \sqrt{p_n}) \dots\dots\dots (G2)$$

式中: n ——测点数;

ε ——毕托管校正系数,标准毕托管 $\varepsilon=1$;

$p_1, p_2, \dots, p_n$ ——各测点的动压头,Pa;

ρ_t ——工作状态下气体的密度,kg/m³;

$$\rho_t = \rho_0 \times 273/(273 + t)$$

式中: t ——管道中气体的温度,℃;

ρ_0 ——标准状态下的气体密度,kg/m³;按下式计算:

$$\rho_0 = 0.1 \sum x_i \cdot \rho_{0i}$$

式中: ρ_{0i} ——各气体成分在标准状况下的密度,见附录E表E5。

G2.2 气体的平均流量

$$V_0 = 3600A \cdot \omega \times 273/(273 + t) \times (101325 + p_t)/101325 \times (1/m_h') \dots\dots\dots (G3)$$

式中: A ——管道截面积,m²;

p_t ——管道中实际温度下气体的静压头,Pa;

V_0 ——标准状况下气体的平均流量,m³/kg 产品。

附 录 H

奥氏气体分析仪的使用方法

(参考件)

H1 奥氏气体分析仪

奥氏气体分析仪是利用化学吸收法,按容积测定气体成分的仪器。常用来分析气体中的二氧化碳、氧气、一氧化碳、氮气的容积分数。

H2 取样要求

一般来说,烟道截面上烟气成分的含量分布常常是不均匀的,因此,插入烟道的取样管上要开一些均匀的小孔,如图H1所示。烟气分析试样的抽取可利用球胆或者排水取气等方法进行。取样时应注意将吸收瓶内空气排净,特别是在窑炉负压区内取样时要严格封闭,防止将外部空气吸入取样瓶内造成分析结果误差。

H3 吸收剂的配制方法

H3.1 二氧化碳吸收液

取100g氢氧化钾溶于200mL的蒸馏水中。

H3.2 氧气吸收液

取100g氢氧化钾溶于130mL蒸馏水中,另取20g焦性没食子酸溶于60mL蒸馏水中,将两者配成混合液,配成后立即装入棕色瓶中密封,以免与空气接触失效。

QB/T 1493—1992

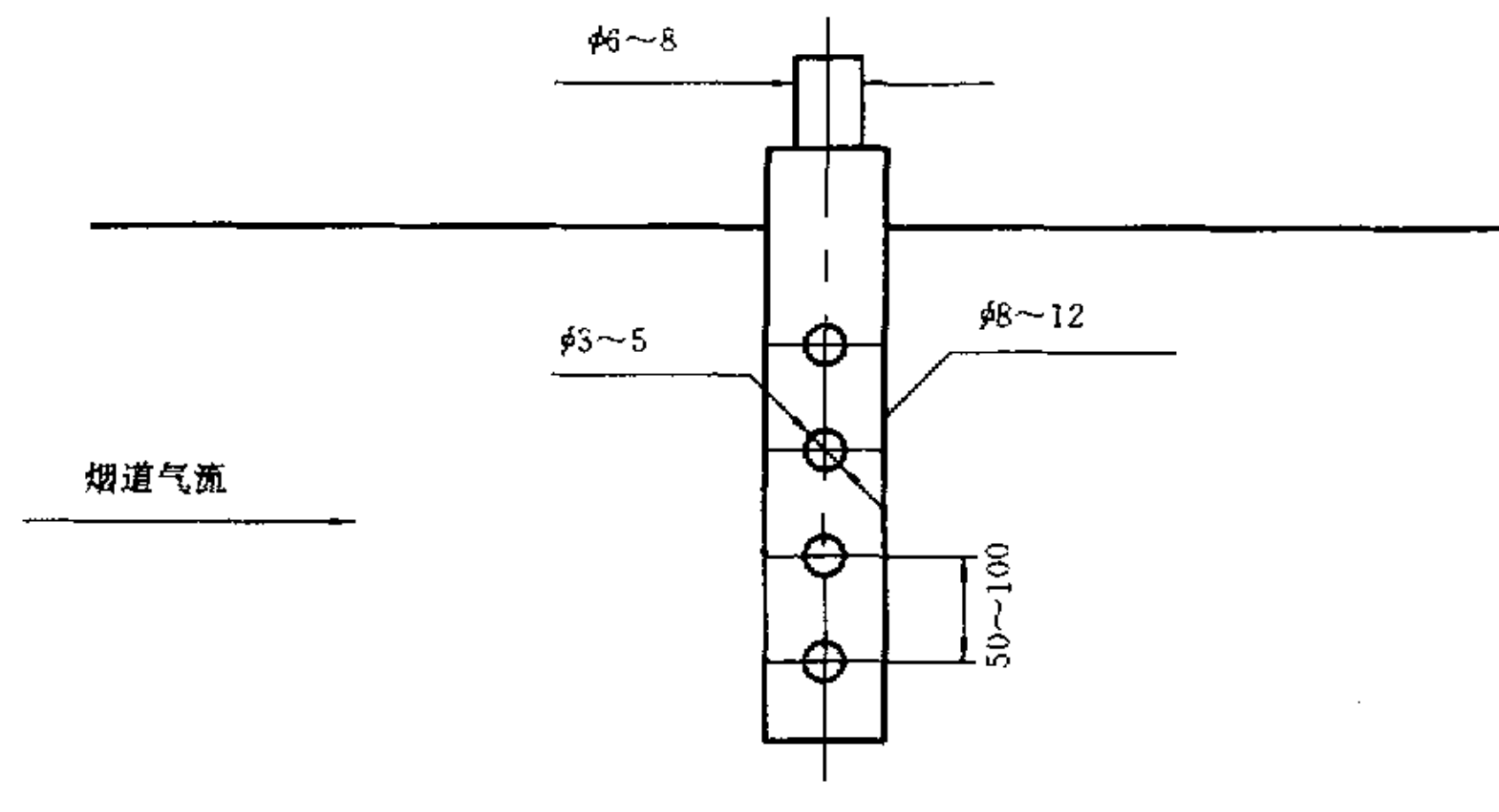


图 H1 取样管小孔示意图

H3.3 一氧化碳吸收液

取 66 g 氯化铵和 54 g 氯化亚铜溶于 100 mL 蒸馏水中,再加入该溶液体积 1/3 的氨水(25%)。

H3.4 氨气吸收液

10 mL 浓硫酸加入 90 mL 水中即可。

排气瓶液:5%硫酸溶液加氯化钠使成饱和溶液,甲基橙指示剂至微红色。

H4 奥氏气体分析仪使用要求

H4.1 为防止分析仪漏气,各旋塞接触面应涂凡士林油膏,各玻璃部件的连接应用弹性好的厚橡皮管,各玻璃旋塞应用橡皮筋栓紧。

H4.2 分析程序是:首先测定二氧化碳,其次是氧气,最后测定一氧化碳。

为防止氨水分解出氨气,在最后吸收瓶中做一下吸收氨气,以免造成误差。

H5 计算空气过剩系数 α

H5.1 燃料中含氮量与燃烧空气中含氮量比较很少(如固体、液体燃料)时:

$$\alpha = V_n / [V_n - (V_o - 0.5V_{co}) \times (79/21)] \quad \dots\dots\dots (H1)$$

式中: V_n 、 V_o 、 V_{co} ——分别表示烟气中氮气、氧气和一氧化碳的体积分数。

H5.2 燃料中含氮量较高(如发生炉煤气)时:

$$\alpha = (V_n - V'_n) / [(V_n - V'_n) - (V_o - 0.5V_{co} - 0.5V_h - 2V_{ch}) \times (79/21)] \quad \dots\dots\dots (H2)$$

式中: V'_n 、 V_h 、 V_{ch} ——燃料中氮气、氢气、甲烷的体积分数。

附 录 J**日用陶瓷产品中玻璃相含量的测定方法**

(参考件)

J1 测定仪器

DQT 型偏光显微镜电动求积仪。

J2 测定方法

将陶瓷试样磨成厚度为 30 μm 以下的超薄片,在偏光显微镜下,运用计点法识别测定玻璃相、晶体

QB/T 1493—1992

及气孔各组分的百分比含量。计点数一般在 2 000 个以上。薄片玻璃相点数占总计点数百分比为该陶瓷试样玻璃相的体积百分比,从而求出玻璃相的体积百分比含量。

例如某陶瓷试样薄片在偏光显微镜电动求积仪下,计点数为 2 500 个时,测得玻璃相的点数为 1 325 个,则玻璃相的点数占总计点数的 53%,那么玻璃相的含量为 53%。

附加说明:

本标准由轻工业部生产协调司提出。

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负责起草。

本标准主要起草人赵德麟、陈立骏、张儒岭。