



# 中华人民共和国建材行业标准

JC 488—92

---

## 玻璃池窑热平衡测定与计算方法

1992-08-11 发布

1993-02-01 实施

国家建筑材料工业局 发布

# 目 次

1 主题内容与适用范围 .....	( 1 )
2 引用标准 .....	( 1 )
3 单位、符号与代号.....	( 1 )
4 基准 .....	( 1 )
5 体系 .....	( 1 )
6 热平衡框图 .....	( 2 )
7 记录、测定项目及测定方法.....	( 2 )
8 物料平衡计算 .....	( 4 )
9 热平衡计算 .....	( 8 )
10 池窑热效率.....	( 15 )
附录 A 符号、代号的说明(补充件) .....	( 16 )
附录 B 燃料低位发热量的计算(补充件) .....	( 22 )
附录 C 理论空气量、烟气量及空气系数计算(补充件) .....	( 23 )
附录 D 玻璃液理论澄清温度和平均比热容计算(补充件).....	( 24 )
附录 E 记录、测定事项一览表(参考件) .....	( 28 )
附录 F 每千克粉料(湿基)逸出气体产物量和形成氧化物量计算(参考件).....	( 34 )
附录 G 各类数据表(参考件).....	( 36 )
附录 H 烟气中水分含量测定方法(参考件) .....	( 39 )
附录 I 煤气中焦油、水分含量的测定方法(参考件) .....	( 40 )
附录 J 测定气体流量时测点的选择与计算方法(参考件) .....	( 43 )

## 玻璃池窑热平衡测定与计算方法

### 1 主题内容与适用范围

本标准规定了玻璃池窑热平衡测定的项目、内容及玻璃池窑热平衡、热效率的计算方法。  
本标准适用于烧液体燃料、气体燃料的玻璃池窑热平衡测定与计算。

### 2 引用标准

- GB 384 石油产品热值测定法
- GB 1884 石油和液体石油产品密度测定法 密度计法
- GB 1885 石油计量换算表
- GB 2586 热量单位、符号与换算
- GB 2587 热设备能量平衡通则
- GB 2588 设备热效率计算通则
- GB 2624 流量测量节流装置 第一部分 节流件为角接取压、法兰取压标准孔板和角接取压标准喷嘴
- GB 3100 国际单位制及其应用
- GB 3101 有关量、单位和符号的一般原则
- SY L 04 天然气流量的标准孔板计量方法

### 3 单位、符号与代号

- 3.1 本标准采用 GB 3100 中规定的量和单位。
- 3.2 本标准采用的符号与代号见附录 A。

### 4 基准

- 4.1 热平衡计算以 0℃ 为基准温度。
- 4.2 燃料发热量以燃料应用基低位发热量为基准。
- 4.3 气体的体积均以标准状态(0℃, 101325 Pa)下的体积量为基准。
- 4.4 质量均以千克为基准。
- 4.5 各项计算中的时间均以小时为基准。
- 4.6 空气采用下列组成:
  - 按体积百分数:氧(O<sub>2</sub>)21.0%, 氮(N<sub>2</sub>)79.0%
  - 按质量百分数:氧(O<sub>2</sub>)23.2%, 氮(N<sub>2</sub>)76.8%

### 5 体系

玻璃池窑热平衡体系包括池窑的熔化部、冷却部、工作部、供料道进口段、引上室、小炉、蓄热室、换热器及部分烟道,以窑体的外表面和物料进、出窑体的界面作为体系与外界的分界面。

## 6 热平衡框图

热平衡框图见图 1。

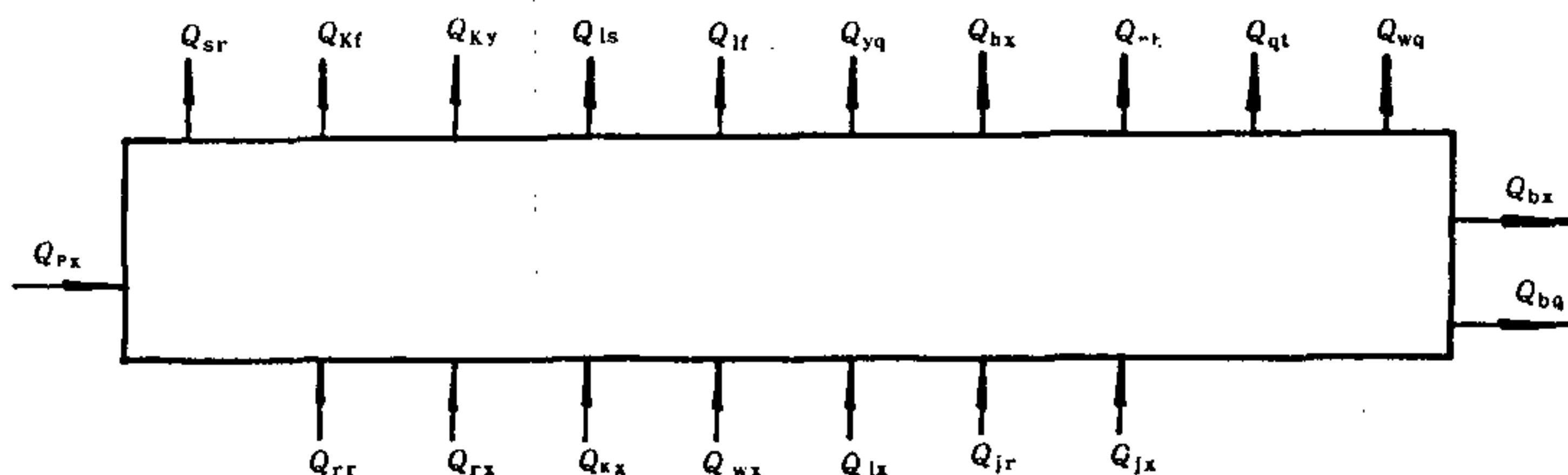


图 1 热平衡框图

## 7 记录、测定项目及测定方法

### 7.1 测定前的准备工作

7.1.1 根据具体情况制订测定方案,确定测定项目、参数,选择合适的测量位置和测量仪表、器械。

7.1.2 选用的测量仪表必须经检定合格。

7.1.3 根据测定方案绘出测点布置图,开设必要的测量孔洞。

### 7.2 测定中的注意事项

7.2.1 玻璃池窑热平衡测定必须在池窑生产正常稳定的状况下进行,测定期间如遇生产状况不稳定。应停止测定,待恢复到原稳定状态后再进行测定,停止测定期间的各种物料量(如玻璃液产量、燃料消耗量等),在计算平均值时应不包括在内。

7.2.2 对所测的各项参数,测前要根据经验有所估计,对一些主要的被测参数要重复测定。

7.2.3 测定周期要尽量缩短。

### 7.3 记录,测定项目数值汇总

7.3.1 池窑基本情况可按附录 E 表 E1 填写。

7.3.2 池窑主要技术经济指标可按附录 E 表 E2 填写。

7.3.3 实测项目可按附录 E 表 E3~表 E5 填写。

7.3.4 实测数据按项目汇总整理。

7.4 测定项目和测定方法按表 1 进行。

表 1 测定项目和测定方法

测定项目	测定参数	测定方法
燃料	成分	重油成分(C、H、O、N、S、A)由燃料供应部门提供,密度和水分含量可在进窑端的管路上取样,由厂化验室测定,密度的测定方法按 GB 1884、GB 1885 进行 气体燃料成分(CO、H <sub>2</sub> 、CH <sub>4</sub> 、C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> 、O <sub>2</sub> 、N <sub>2</sub> 、CO <sub>2</sub> )在进窑端取样后用奥氏气体分析仪测定,气体燃料中的水分,焦油含量按附录 I 测定,取三次测定平均值

续表 1

测定项目	测定参数	测定方法
燃料	低位发热量	燃料的低位发热量可用专门的量热计测定,也可根据燃料成分按附录 B 计算
	温度	重油、冷煤气(天然气)在进入体系的入口处用温度计测定,热煤气用热电偶测量
	流量	重油流量用容积式流量计测量,并根据油温、密度换算成质量流量 煤气流量用毕托管测量,方法按附录 J,取三次测定平均值 天然气流量采用有温度和压力补偿的标准孔板计量,计量方法按 GB 2624 或 SYL 04
助燃空气	温度	用温度计在助燃空气入体系的界面处测量
	流量	用毕托管或热球风速仪在助燃空气入体系的界面处测量,方法按附录 J
冷却风	温度	吹向窑体前的温度用温度计在支风管内测量 吹向窑体后的反射风温度用带遮蔽罩的温度计测量,取三点平均值
	流量	在总风管上用毕托管或热球风速仪测量,方法按附录 J
配合料	温度	用温度计在投料机出料口测量料层温度
	用量	统计每班上料次数,折算为每天投料量,取测定期间平均值
	含水率	投料机出口取样分析
	含碎玻璃量	根据碎玻璃称量记录或根据配料记录单计算
	成分	各种粉料的化学成分由厂化验室提供
玻璃液	温度	在出体系处用热电偶测量,至少测三点,取平均值
	产量	根据实测玻璃液出料量或投料量计算
烟气	温度	对蓄热式窑,在烟气出体系界面处,分上、中、下三点,分别用抽气热电偶或热电偶连续测一个换火周期,求得各点在一个换火周期内烟气平均温度,然后再求三个平均温度的平均值 对换热式窑,在出换热器后烟气出体系的界面处,分不同部位,测三点温度,求平均值

续表 1

测定项目		测定参数	测定方法
烟气		流量、静压	在烟气出体系界面处用毕托管与微差压计测量,方法按附录 J,测三次,取平均值,在测量困难时,可根据理论计算
		成分	用球胆或取样瓶取样,用奥氏气体分析仪测量
		含水率	在烟气出体系界面处按附录 H 方法测定
表面散热量		表面温度	根据窑的结构,各部位所处的环境,将窑的外表面分成若干区域,并根据各区域面积的大小和表面温度的差异,在每个区域内分别布置几个或几十个测点,用表面温度计测量
		表面散热量	根据表面温度计算,或用热流计直接测量
		表面积	根据设计图纸计算
孔口辐射散热量		辐射温度	用红外辐射高温计或光学高温计测量
		孔口面积	用直尺测量或查阅图纸计算
孔口溢流气体		温度	用热电偶测量
		流量	用微压计测量孔口内外静压差后计算
冷却水		温度	进出口温度用温度计测量
		流量	称量或用盛器、秒表、米尺测量,然后计算质量流量
雾化介质	压缩空气	温度	用温度计测量
		流量	用带有温度、压力补偿的孔板或其他等效的流量计测量,无法测量时可取设计值
	蒸汽	温度	用温度计测量
		压力	用压力表测量
		流量	用蒸汽流量计测量,无法测量时可取设计值
环境温度	温度	对各个不同的区域,分别取区域附近的最低空气温度作为该区域的环境温度,用带遮蔽罩的温度计测量	
大气压	压力	用大气压力表测量,或采用当地气象部门同期的测量数据	

## 8 物料平衡计算

### 8.1 进体系物料质量计算

#### 8.1.1 燃料质量 $m_r$ , kg/h

8.1.1.1 当使用重油作燃料时:

$$m_r = V_r \times \rho_t / 24 \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$\rho_t = \frac{\rho_{20}}{1 + \beta \times (t_r - 20)} \quad \dots\dots\dots(2)$$

式中:  $V_r$  ——测定期间平均日耗油量,  $m^3/d$ ;  
 $\rho_t$  ——重油流经流量计时的密度,  $kg/m^3$ , 实测或按(2)式计算;  
 $\rho_{20}$  ——20℃时重油的密度,  $kg/m^3$ , 由实测得;  
 $\beta$  ——体积膨胀系数,  $\beta = 0.0025 - 0.002 \times \rho_{20} \times 10^{-3}$ ;  
 $t_r$  ——重油流经流量计时的温度, ℃。

8.1.1.2 当使用气体燃料时:

$$m_r = V_{or} \times \rho_o \quad \dots\dots\dots(3)$$

式中:  $V_{or}$  ——气体燃料量,  $m^3/h$ , 按(4)式计算:

$$V_{or} = 3600 \times S_d \times K_d \frac{\sum_{i=1}^n \sqrt{\Delta P_i}}{n} \times \sqrt{\frac{2 \times (P + P_j) \times 273}{\rho_o \times 101325 \times (273 + t_q)}} \quad \dots\dots\dots(4)$$

式中:  $V_{or}$  ——气体燃料量, [进体系助燃空气量  $V_{ok}$ 、出体系烟气流量  $V_{oy}$ 、冷却风量  $V_{lf}$  也按式(4)计算],  $m^3/h$ ;

$S_d$  ——测流量断面的截面积,  $m^2$ ;  
 $\Delta P_i$  ——测流量断面内第  $i$  点的动压值, Pa;  
 $K_d$  ——毕托管校正系数;  
 $n$  ——测流量断面内的测点数;  
 $P$  ——大气压, Pa;  
 $P_j$  ——测流量断面内的静压, Pa;  
 $t_q$  ——测流量断面内的气体平均温度, ℃;  
 $\rho_o$  ——标准状态下气体的密度,  $kg/m^3$ , 按(5)式计算:

$$\rho_o = 0.01 \Sigma(X_i \rho_{oi}) \quad \dots\dots\dots(5)$$

式中:  $X_i$  ——气体中各组分的体积百分含量, %;  
 $\rho_{oi}$  ——标准状态下气体中各组分的密度,  $kg/m^3$ , 见附录 G 表 G1。

8.1.2 助燃空气质量  $m_K$ ,  $kg/h$

$$m_K = 1.293 \times V_{ok} \quad \dots\dots\dots(6)$$

式中:  $V_{ok}$  ——进体系助燃空气量,  $m^3/h$ , 用毕托管测量时, 按(4)式计算, 用热球风速仪测量时, 按(7)式计算。

$$V_{ok} = 3\,600 \times \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i}{n} \times \frac{273}{273 + t_k} \times \frac{P + P_i}{101\,325} \times S_d \quad \dots\dots\dots(7)$$

式中:  $\omega_i$  ——测流量断面内第  $i$  点气体流速,  $m/s$ 。

8.1.3 配合料质量  $m_p$ ,  $kg/h$

$$m_p = n_p \times m_t \times (1 + m_{fs})/24 \quad \dots\dots\dots(8)$$

式中:  $n_p$  ——测定期间平均日投料付数, 付/d;

$m_t$  ——每付粉料(湿基)的质量,  $kg/付$ ;

$m_{fs}$  ——每千克粉料(湿基)配成配合料时添加的碎玻璃量  $kg/kg$ 。

8.1.4 雾化介质质量  $m_w$ ,  $kg/h$

8.1.4.1 当使用压缩空气作雾化介质时:

$$m_w = 1.293 \times V_{ow} \quad \dots\dots\dots(9)$$

式中:  $V_{ow}$  ——雾化用压缩空气流量,  $m^3/h$ 。

8.1.4.2 当使用蒸汽作雾化介质时:

采用实测蒸汽质量  $m_w$ , 若实测困难时可取设计值。

8.1.5 漏入空气质量  $m_l$ ,  $kg/h$

8.1.5.1 当使用重油作燃料时:

$$m_l = 1.293 \times (\alpha_c - \alpha_k) \times V_K^0 \times m_r \quad \dots\dots\dots(10)$$

式中:  $\alpha_c$  ——烟气出体系时的空气系数。计算见附录 C;

$\alpha_k$  ——烟气离开熔化部时(按各燃烧器或小炉热负荷比例)平均空气系数;

$V_K^0$  ——理论空气量,  $m^3/kg$ , 计算见附录 C。

8.1.5.2 当使用气体燃料时:

$$m_l = 1.293 \times (\alpha_c - \alpha_k) \times V_K^0 \times V_{or} \quad \dots\dots\dots(11)$$

式中:  $V_K^0$  ——气体理论空气量,  $m^3/m^3$ , 计算见附录 C。

8.1.6 进体系物料总质量  $m_m$ ,  $kg/h$

$$m_m = m_r + m_K + m_p + m_w + m_l \quad \dots\dots\dots(12)$$

8.2 出体系物料质量计算

8.2.1 烟气质量  $m_y$ ,  $kg/h$



$$m_y = V_{oy} \times \rho_o \quad \dots\dots\dots(13)$$

式中:  $V_{oy}$  —— 出体系时烟气流量,  $m^3/h$ , 按(4)式计算。

8.2.2 玻璃液质量  $m_b$ ,  $kg/h$

8.2.2.1 按出料量计算时:

a. 日用玻璃池窑

$$m_b = m_{bz} \times n_{bz} \quad \dots\dots\dots(14)$$

式中:  $m_{bz}$  —— 单个料滴的质量,  $kg/个$ ;

$n_{bz}$  —— 每小时的料滴数,  $个/h$ 。

b. 平板玻璃池窑

$$m_b = \omega_b \times m_{bp} \quad \dots\dots\dots(15)$$

式中:  $\omega_b$  —— 玻璃原板平均拉引速度,  $m/h$ ;

$m_{bp}$  —— 玻璃原板平均每米质量,  $kg/m$ 。

8.2.2.2 按投料量计算时:

$$m_b = \frac{m_p}{m_{bf} + m_{bs}} \quad \dots\dots\dots(16)$$

$$m_{bf} = \frac{1}{1 - m_{iq} + m_{ts}} \quad \dots\dots\dots(17)$$

$$m_{bs} = m_{bf} \times m_{ts} \quad \dots\dots\dots(18)$$

式中:  $m_{bf}$  —— 熔成每千克玻璃液所需粉料(湿基)量,  $kg/kg$ , 按(17)式计算;

$m_{bs}$  —— 熔成每千克玻璃液所需碎玻璃量,  $kg/kg$ , 按(18)式计算;

$m_{iq}$  —— 每千克粉料(湿基)中逸出气体的质量,  $kg/kg$ 。

8.2.3 溢流气体质量  $m_{Ky}$ ,  $kg/h$

$$m_{Ky} = \sum_{i=1}^n V_{yi} \rho_o \quad \dots\dots\dots(19)$$

式中:  $V_{yi}$  —— 窑体第  $i$  个孔口的溢流气体量,  $m^3/h$ , 按(20)式计算。

$$V_{yi} = \pm 3\,600 \times S_{Ki} \times \mu_i \times \sqrt{\frac{2 \times |\Delta P_{Ki}| \times (P + \Delta P_{Ki}) \times 273}{\rho_o \times 101\,325 \times (t_{yi} + 273)}} \quad \dots\dots\dots(20)$$

式中： $S_{Ki}$ ——窑体第*i*个孔口的面积， $m^2$ ；

$t_{yi}$ ——窑体第*i*个孔口溢流气体温度， $^{\circ}C$ ；

$\Delta P_{Ki}$ ——孔口内外静压差， $Pa$ ；当 $\Delta P_{Ki}$ 为正值时， $V_{yi}$ 取正值；当 $\Delta P_{Ki}$ 为负值时， $V_{yi}$ 取负值；

$\mu_i$ ——窑体第*i*个孔口的溢流系数，

当 $\delta \geq 3.5 d_e$ 时， $\mu_i = 0.82$ ；

当 $\delta < 3.5 d_e$ 时， $\mu_i = 0.62$ ；

$\delta$ ——溢流孔口处窑墙厚度， $m$ ；

$d_e$ ——溢流孔口当量直径， $m$ 。

8.2.4 其他出体系物料质量  $m_{qt}$ ,  $kg/h$

$$m_{qt} = m_{zs} - (m_y + m_b + m_{Ky}) \dots\dots\dots(21)$$

注：其他出体系物料质量的绝对值占进体系总物料质量的比例应不大于5%，否则应对测定与计算结果进行复核。

8.2.5 出体系物料总质量  $m_{xc}$ ,  $kg/h$

$$m_{xc} = m_y + m_b + m_{Ky} + m_{qt} \dots\dots\dots(22)$$

8.3 物料平衡表

物料平衡表见表2。

表 2

进体系物料质量				出体系物料质量			
序号	项 目	数值 kg/h	%	序号	项 目	数值 kg/h	%
1	燃料质量 $m_f$			1	烟气质量 $m_y$		
2	助燃空气质量 $m_k$			2	玻璃液质量 $m_b$		
3	配合料质量 $m_p$			3	溢流气体质量 $m_{Ky}$		
4	雾化介质质量 $m_w$			4	其它出体系物料质量 $m_{qt}$		
5	漏入空气质量 $m_l$						
合计	进体系物料总质量 $m_{zs}$			合计	出体系物料总质量 $m_{xc}$		

9 热平衡计算

9.1 熔成每千克玻璃液理论耗热量计算

9.1.1 硅酸盐形成反应耗热  $Q_1$ ,  $kJ/kg$

$$Q_1 = m_{bf} \sum_{i=1}^n q_i m_{hi} \dots\dots\dots(23)$$

式中： $q_i$ ——各种原料硅酸盐形成反应热(以千克分解氧化物计)， $kJ/kg$ ，查附录 G 表 G4；

$m_{bi}$  ——每千克粉料(湿基)中,各种原料引入的分解氧化物质量,kg/kg,见附录 F 表 F2。

9.1.2 形成玻璃液耗热  $Q_2$ ,kJ/kg

$$Q_2 = 347 \times m_{bi} \times (1 - m_{iq}) \quad \dots\dots\dots(24)$$

9.1.3 加热玻璃液到理论澄清温度耗热  $Q_3$ ,kJ/kg

$$Q_3 = c_{bl} \times t_{bl} \quad \dots\dots\dots(25)$$

式中:  $t_{bl}$  ——玻璃液在粘度为 10 Pa·s 时的温度值,即为玻璃液理论澄清温度,℃,计算方法见附录 D;

$c_{bl}$  ——玻璃液在 0~ $t_{bl}$  ℃时的平均比热容,kJ/(kg·℃),计算方法见附录 D。

9.1.4 蒸发有效水分耗热  $Q_4$ ,kJ/kg

$$Q_4 = 2491 \times m_{bi} \times m_{H_2O} \quad \dots\dots\dots(26)$$

式中:  $m_{H_2O}$  ——每千克粉料中含有效水质量,kg/kg。

注:本标准规定,实测水分小于 5%时,有效水分取实测水分值,实测水分大于 5%时,有效水分取 5%。

9.1.5 加热去气产物到玻璃液理论澄清温度耗热  $Q_5$ ,kJ/kg

$$Q_5 = m_{bi} \times V_{iq} \times c_{iq} \times t_{bl} \quad \dots\dots\dots(27)$$

式中:  $V_{iq}$  ——每千克粉料中逸出气体的体积,m<sup>3</sup>/kg,计算方法见附录 F 表 F1;

$c_{iq}$  ——在 0~ $t_{bl}$  ℃时逸出气体的平均比热容,kJ/(m<sup>3</sup>·℃),按(28)式计算。

$$c_{iq} = 0.01(\sum X_i c_{pi}) \quad \dots\dots\dots(28)$$

式中:  $c_{iq}$  ——气体的平均定压比热容,kJ/(m<sup>3</sup>·℃);

$c_{pi}$  ——气体中第  $i$  组分的平均定压比热容,kJ/(m<sup>3</sup>·℃),见附录 G 表 G2、表 G3。

9.1.6 配合料入窑显热  $Q_6$ ,kJ/kg

$$Q_6 = m_{bf} \times c_n \times t_n + m_{bs} \times c_s \times t_s \quad \dots\dots\dots(29)$$

式中:  $t_n$  ——粉料入窑温度,℃;

$c_n$  ——粉料在 0~ $t_n$  ℃时的平均比热容,一般取  $c_n = 0.963$  kJ/(kg·℃);

$t_s$  ——碎玻璃入窑温度,℃;

$c_s$  ——碎玻璃在 0~ $t_s$  ℃时的平均比热容,kJ/(kg·℃)计算方法见附录 D。

9.1.7 熔成每千克玻璃液理论耗热量  $Q_b$ ,kJ/kg

$$Q_b = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 - Q_6 \quad \dots\dots\dots(30)$$

9.2 池窑有效热计算

$$Q_{yx} = m_b \times Q_b \dots\dots\dots(31)$$

式中:  $Q_{yx}$  —— 池窑有效热, kJ/h。

9.3 输入体系热量计算

9.3.1 燃料燃烧热  $Q_{rr}$ , kJ/h

9.3.1.1 当使用重油时:

$$Q_{rr} = m_r \times Q_{DW}^y \dots\dots\dots(32)$$

式中:  $Q_{DW}^y$  —— 重油低位发热量, kJ/kg, 计算方法见附录 B。

9.3.1.2 当使用气体燃料时:

$$Q_{rr} = V \times Q_{DW}^y \dots\dots\dots(33)$$

式中:  $Q_{DW}^y$  —— 气体燃料低位发热量, kJ/m<sup>3</sup>, 计算方法见附录 B。

9.3.2 燃料显热  $Q_{rx}$ , kJ/h

9.3.2.1 当使用重油时:

$$Q_{rx} = m_r \times c_r \times t_r \dots\dots\dots(34)$$

$$c_r = 1.74 + 0.0025t_r \dots\dots\dots(35)$$

式中:  $t_r$  —— 重油入体系时温度, °C;

$c_r$  —— 重油在 0~ $t_r$  °C 时的平均比热容, kJ/(kg·°C), 按(35)式计算。

9.3.2.2 当使用气体燃料时:

$$Q_{rx} = V_{or} \times c_{qr} \times t_{qr} \dots\dots\dots(36)$$

式中:  $t_{qr}$  —— 气体燃料入体系时温度, °C;

$c_{qr}$  —— 气体燃料在 0~ $t_{qr}$  °C 时的平均比热容, kJ/(m<sup>3</sup>·°C), 按(28)式计算。

9.3.3 助燃空气显热  $Q_{Kx}$ , kJ/h

$$Q_{Kx} = V_{oK} \times c_K \times t_K \dots\dots\dots(37)$$

式中:  $t_K$  —— 助燃空气入体系时温度, °C;

$c_K$  —— 助燃空气在 0~ $t_K$  °C 时的平均比热容, kJ/(m<sup>3</sup>·°C), 查附录 G 表 G2。

9.3.4 雾化介质显热  $Q_{wx}$ , kJ/h

9.3.4.1 压缩空气作雾化介质时:

$$Q_{wx} = V_{ow} \times c_{wK} \times t_{wK} \dots\dots\dots(38)$$

式中:  $t_{wk}$  ——压缩空气入体系时温度, °C;

$c_{wk}$  ——压缩空气在  $0 \sim t_{wk}$  °C 时的平均比热容,  $\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{°C})$ , 查附录 G 表 G2。

9.3.4.2 蒸汽作雾化介质时:

$$Q_{wx} = m_w \times i'' \quad \dots\dots\dots(39)$$

式中:  $i''$  ——入体系蒸汽热焓,  $\text{kJ}/\text{h}$ , 根据蒸汽压力查饱和蒸汽表或根据蒸汽压力、温度查过热蒸汽表。

9.3.5 漏入空气显热  $Q_{lx}$ ,  $\text{kJ}/\text{h}$

9.3.5.1 当使用重油时:

$$Q_{lx} = (a_c - a_k) \times V_K^o \times m_r \times c_1 \times t_1 \quad \dots\dots\dots(40)$$

式中:  $t_1$  ——漏入空气平均温度, °C;

$c_1$  ——漏入空气在  $0 \sim t_1$  °C 时的平均比热容,  $\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{°C})$ , 查附录 G 表 G2。

9.3.5.2 当使用气体燃料时:

$$Q_{lx} = (a_c - a_k) \times V_K^o \times V_{or} c_1 \times t_1 \quad \dots\dots\dots(41)$$

9.3.6 配合料显热  $Q_{px}$ ,  $\text{kJ}/\text{h}$

$$Q_{px} = m_b \times Q_6 \quad \dots\dots\dots(42)$$

9.3.7 焦油燃烧热  $Q_{jr}$ ,  $\text{kJ}/\text{h}$

$$Q_{jr} = V_{or} \times m_j \times Q'_{Dw} \quad \dots\dots\dots(43)$$

式中:  $m_j$  ——每立方米煤气中焦油含量,  $\text{kg}/\text{m}^3$ , 测定和计算方法见附录 I;

$Q'_{Dw}$  ——焦油低位发热量,  $\text{kJ}/\text{kg}$ , 计算方法见附录 B。

9.3.8 焦油显热  $Q_{jx}$ ,  $\text{kJ}/\text{h}$

$$Q_{jx} = V_{or} \times m_j \times c_j \times t_{qr} \quad \dots\dots\dots(44)$$

式中:  $c_j$  ——焦油在  $0 \sim t_{qr}$  °C 时的平均比热容,  $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{°C})$ , 按(35)式计算。

9.3.9 输入体系总热量  $Q_{zs}$ ,  $\text{kJ}/\text{h}$

$$Q_{zs} = Q_{rr} + Q_{rx} + Q_{Kx} + Q_{wx} + Q_{lx} + Q_{px} + Q_{jr} + Q_{jx} \quad \dots\dots\dots(45)$$

9.4 输出体系热量计算

9.4.1 玻璃液带出显热  $Q_{bx}$ ,  $\text{kJ}/\text{h}$

$$Q_{bx} = m_b \times c_{bc} \times t_{bc} \quad \dots\dots\dots(46)$$

式中:  $t_{bc}$  ——玻璃液出体系时温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$c_{bc}$  ——玻璃液在  $0 \sim t_{bc}$   $^{\circ}\text{C}$  时的平均比热容,  $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$ , 计算方法见附录 D。

9.4.2 玻璃液带出潜热  $Q_{bq}$ ,  $\text{kJ}/\text{h}$

$$Q_{bq} = m_b \times (Q_1 + Q_2 + 2491 \times m_{bt} \times m'_{\text{H}_2\text{O}}) \dots\dots\dots(47)$$

式中:  $m'_{\text{H}_2\text{O}}$  ——每千克粉料中实测含水质量,  $\text{kg}/\text{kg}$ , 见附录 E 表 E4。

9.4.3 池窑表面散热  $Q_{sr}$ ,  $\text{kJ}/\text{h}$

$$Q_{sr} = \sum_{i=1}^{n_b} (Q_{sri} S_{bi}) \dots\dots\dots(48)$$

式中:  $S_{bi}$  ——池窑表面第  $i$  部位的表面积,  $\text{m}^2$ ;

$n_b$  ——池窑表面的测点数, 个;

$Q_{sri}$  ——池窑表面第  $i$  部位的表面散热量,  $\text{kJ}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ , 用热流计直接测量, 或按(49)式计算。

$$Q_{sri} = \alpha_i \times (t_{wi} - t_{oi}) \dots\dots\dots(49)$$

式中:  $t_{wi}$  ——窑体第  $i$  部位外表面温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$t_{oi}$  ——环境温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$\alpha_i$  ——对流辐射换热系数,  $\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^{\circ}\text{C})$ , 按(50)式计算。

$$\alpha_i = A_w \times (t_{wi} - t_{oi})^{1/4} + \frac{20.4 \times \epsilon_i \times \left[ \left( \frac{t_{wi} + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{t_{oi} + 273}{100} \right)^4 \right]}{t_{wi} - t_{oi}} \dots\dots\dots(50)$$

式中:  $A_w$  ——取决于散热面位置的系数, 按表 3 取值;

$\epsilon_i$  ——窑墙第  $i$  部位外表面黑度。

表 3  $A_w$  系数值

散热面位置	散热面向上	散热面垂直	散热面向下
$A_w$	11.7	9.2	7.5

9.4.4 孔口辐射散热  $Q_{Kf}$ ,  $\text{kJ}/\text{h}$

9.4.4.1 孔口敞开时:

$$Q_{Kf} = \sum_{i=1}^n \left\{ c_0 \times \left[ \left( \frac{t_{fi} + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{t_{oi} + 273}{100} \right)^4 \right] \times \phi_i \times S_{Ki} \right\} \dots\dots\dots(51)$$

式中:  $c_0$  ——黑体辐射系数,  $c = 20.4 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}^4 \cdot \text{h})$ ;

$t_{fi}$  ——窑体第  $i$  个孔口的辐射温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$\phi_i$  ——窑体第  $i$  个孔口的门孔系数, 取决于孔的形状、尺寸及窑墙的厚度, 查图 2。

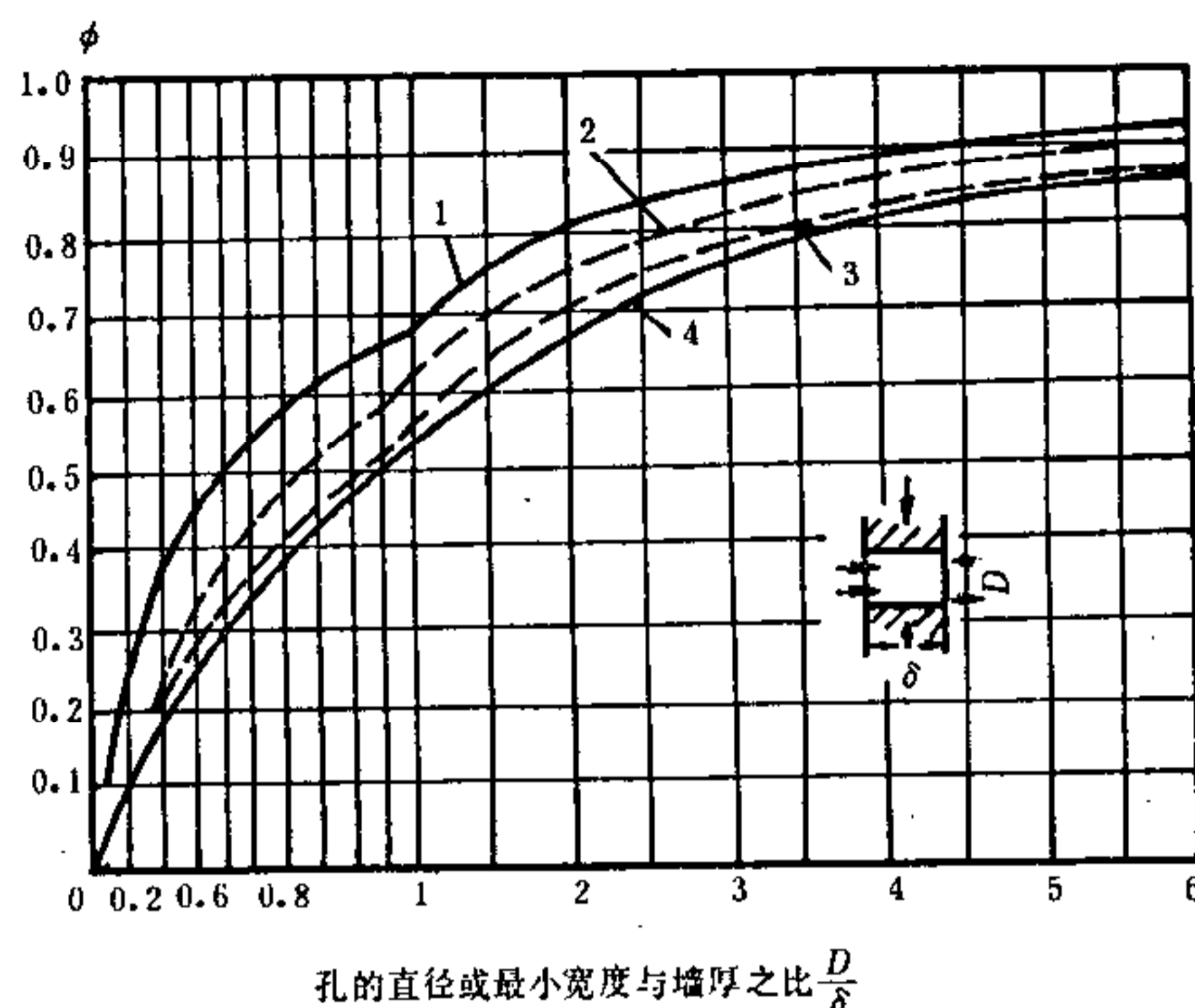


图 2 门孔系数计算图  
 1—伸长的长方形；2—长方形(2:1)；3—正方形；  
 4—圆形

9.4.4.2 孔口用金属板盖住时：

$$Q_{Kf} = \sum_{i=1}^n \left\{ \epsilon_m \times c_o \times \left[ \left( \frac{t_{fi} + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{t_{oi} + 273}{100} \right)^4 \right] \times \frac{\phi_i}{1 + \phi_i} \times S_{Ki} \right\} \dots\dots\dots (52)$$

式中：ε<sub>m</sub> ——金属板的黑度，一般取 ε<sub>m</sub> = 0.8。

9.4.4.3 孔口用板砖盖住时：

$$Q_{Kf} = 3.6 \times \sum_{i=1}^n \left( \frac{\lambda}{\delta_i} \times S_{Ki} \times \Delta t_i \right) \dots\dots\dots (53)$$

式中：λ ——板砖的导热系数，W/(m·℃)；  
 δ<sub>i</sub> ——板砖的厚度，m；  
 Δt<sub>i</sub> ——窑体第 i 个孔口板砖的内外表面温差，℃。

9.4.5 孔口溢流气体显热 Q<sub>Ky</sub> ,kJ/h

$$Q_{Ky} = \sum_{i=1}^n (V_{yi} \times c_{yi} \times t_{yi}) \dots\dots\dots (54)$$

式中：t<sub>yi</sub> ——窑体第 i 个孔口的溢流气体温度，℃；  
 c<sub>yi</sub> ——窑体第 i 个孔口的溢流气体在 0~t<sub>yi</sub>℃时的平均比热容，kJ/(m<sup>3</sup>·℃)，按(28)式计算。

9.4.6 冷却水带出热 Q<sub>ls</sub> ,kJ/h

$$Q_{ls} = 4.1868 \times m_{ls} \times (t'_{ls} - t_{ls}) \dots\dots\dots (55)$$

式中:  $m_{ls}$  —— 进出体系的冷却水量, kg/h;

$t'_{ls}$  —— 出体系时冷却水温度, °C;

$t_{ls}$  —— 进体系时冷却水温度, °C。

9.4.7 冷却风带出热  $Q_{lf}$ , kJ/h

$$Q_{lf} = V_{lf} \times (c'_{lf} \times t'_{lf} - c_{lf} \times t_{lf}) \quad \dots\dots\dots(56)$$

式中:  $V_{lf}$  —— 冷却风量, m<sup>3</sup>/h, 用毕托管测量时, 按(4)式计算, 用热球风速仪测量时, 按(7)式计算;

$t'_{lf}$  —— 吹向窑体后的反射风温度, °C;

$c'_{lf}$  —— 0~ $t'_{lf}$  °C冷却风平均比热容, kJ/(m<sup>3</sup>·°C), 查附录 G 表 G2;

$t_{lf}$  —— 吹向窑体前的冷却风温度, °C;

$c_{lf}$  —— 0~ $t_{lf}$  °C冷却风平均比热容, kJ/(m<sup>3</sup>·°C), 查附录 G 表 G2。

9.4.8 烟气显热  $Q_{yq}$ , kJ/h

$$Q_{yq} = V_{oy} \times c_y \times t_y \quad \dots\dots\dots(57)$$

式中:  $t_y$  —— 烟气出体系时平均温度, °C;

$c_y$  —— 0~ $t_y$  °C烟气平均比热容, kJ/(m<sup>3</sup>·°C), 按(28)式计算。

9.4.9 雾化蒸汽潜热  $Q_{wq}$ , kJ/h

$$Q_{wq} = m_w r \quad \dots\dots\dots(58)$$

式中:  $r$  —— 水的汽化热, kJ/kg, 根据蒸汽压力查饱和蒸汽表。

9.4.10 换向热损失  $Q_{hx}$ , kJ/h

$$Q_{hx} = (Q_{rr} + Q_{rx} + Q_{rr} + Q_{rx}) \times (\tau/3600) \times n_h \quad \dots\dots\dots(59)$$

式中:  $\tau$  —— 换向时, 窑内停火时间, s;

$n_h$  —— 每小时换向次数。

注: 只有在烧煤气并有煤气蓄热室的池窑才有此项。

9.4.11 燃料化学不完全燃烧热损失  $Q_{rh}$ , kJ/h

$$Q_{rh} = (126 \times CO' + 108 \times H_2') \times V_{oy} \quad \dots\dots\dots(60)$$

式中:  $CO'$ 、 $H_2'$  —— 出体系烟气中一氧化碳、氢气的体积百分含量。

9.4.12 其他热损失  $Q_{qt}$ , kJ/h

$$Q_{qt} = Q_{zs} - (Q_{bx} + Q_{bq} + Q_{sr} + Q_{Kf} + Q_{Ky} + Q_{ls} + Q_{lf} + Q_{yq} + Q_{wq} + Q_{hx} + Q_{rh}) \quad \dots\dots\dots(61)$$

注: 其他热损失的绝对值占总收入热的比例应不大于 5%, 否则应对测定与计算结果进行复核。

9.4.13 输出体系总热量  $Q_{zs}$ , kJ/h



$$Q_{zc} = Q_{bx} + Q_{bq} + Q_{sr} + Q_{Kf} + Q_{Ky} + Q_{ls} + Q_{lf} + Q_{yq} + Q_{wq} + Q_{hx} + Q_{rh} + Q_{qt} \dots\dots\dots (62)$$

9.5 热平衡计算结果

热平衡计算结果见表 4。

表 4 热平衡表

输入体系热量				输出体系热量			
序号	项 目	数值 kg/h	%	序号	项 目	数值 kg/h	%
1	燃料燃烧热 $Q_{rr}$			1	玻璃液带出显热 $Q_{bx}$		
2	燃料显热 $Q_{rx}$			2	玻璃液带出潜热 $Q_{bq}$		
3	助燃空气显热 $Q_{Kx}$			3	池窑表面散热 $Q_{sr}$		
4	雾化介质显热 $Q_{wx}$			4	孔口辐射散热 $Q_{Kf}$		
5	漏入空气显热 $Q_{lx}$			5	孔口溢流气体显热 $Q_{Ky}$		
6	配合料显热 $Q_{px}$			6	冷却水带出热 $Q_{lw}$		
7	焦油燃烧热 $Q_{rx}$			7	冷却风带出热 $Q_{lf}$		
8	焦油显热 $Q_{rx}$			8	烟气显热 $Q_{yn}$		
				9	雾化蒸汽潜热 $Q_{wq}$		
				10	换向热损失 $Q_{hx}$		
				11	燃料化学不完全燃烧热损失 $Q_{rh}$		
				12	其他热损失 $Q_{qt}$		
合计	输入体系总热量 $Q_{zs}$			合计	输出体系总热量 $Q_{zc}$		

10 池窑热效率

$$\eta = \frac{Q_{yz}}{Q_{GG}} \times 100 \dots\dots\dots (63)$$

式中： $\eta$  —— 池窑热效率，%；

$Q_{GG}$  —— 供给热，kJ/h。

注：供给热  $Q_{GG}$  包括燃料燃烧热、燃料显热及用外热源加热的工质、物料等带入体系的热量。

附 录 A  
符号、代号的说明  
(补充件)

表 A1

序号	符号代号	说 明	单 位
1	$A$	燃料中灰分的百分含量	%
2	$A_w$	取决于散热面位置的系数	
3	$C$	燃料中碳的百分含量	%
4	$c_b$	玻璃液的平均比热容	kJ/(kg·℃)
5	$c_{bo}$	玻璃液出体系时的平均比热容	
6	$c_{bl}$	玻璃液在理论澄清温度时的平均比热容	
7	$c_{fl}$	粉料入窑时的平均比热容	
8	$c_{iq}$	逸出气体在理论澄清温度时的平均比热容	kJ/(m <sup>3</sup> ·℃)
9	$c_j$	焦油入体系时的平均比热容	kJ/(kg·℃)
10	$c_K$	助燃空气入体系时的平均比热容	kJ/(m <sup>3</sup> ·℃)
11	$c_l$	漏入空气的平均比热容	
12	$c_H$	吹向窑体前的冷却风平均比热容	
13	$c'_H$	吹向窑体后的反射风平均比热容	
14	$c_o$	黑体辐射系数	
15	$c_{pi}$	气体中第 $i$ 组分的平均定压比热容	kJ/(m <sup>3</sup> ·℃)
16	$c_q$	气体的平均定压比热容	
17	$c_{qr}$	气体燃料入体系时的平均比热容	
18	$c_s$	碎玻璃入窑时的平均比热容	kJ/(kg·℃)
19	$c_{wk}$	雾化用压缩空气入体系时的平均比热容	kJ/(m <sup>3</sup> ·℃)
20	$c_y$	烟气出体系时的平均比热容	
21	$c_{yi}$	窑体第 $i$ 个孔口的溢流气体平均比热容	
22	$c_z$	重油入体系时的平均比热容	kJ/(kg·℃)

续表 A1

序号	符号代号	说 明	单 位
23	CH <sub>4</sub>	气体燃料中甲烷的体积百分含量	%
24	C <sub>n</sub> H <sub>m</sub>	气体燃料中不饱和烃的体积百分含量	
25	CO	气体燃料中一氧化碳的体积百分含量	
26	CO'	烟气中一氧化碳的体积百分含量	
27	CO <sub>2</sub>	气体燃料中二氧化碳的体积百分含量	
28	CO <sub>2</sub> '	烟气中二氧化碳的体积百分含量	
29	d <sub>e</sub>	孔口当量直径	m
30	H	燃料中氢的百分含量	%
31	H <sub>2</sub>	气体燃料中氢气的体积百分含量	
32	H <sub>2</sub> '	烟气中氢气的体积百分含量	
33	i''	入体系蒸汽热焓	kJ/kg
34	K <sub>d</sub>	毕托管校正系数	
35	m <sub>b</sub>	出体系玻璃液质量	kg/h
36	m <sub>bt</sub>	熔成每千克玻璃液所需粉料(湿基)量	kg/kg
37	m <sub>bp</sub>	玻璃原板平均每米质量	kg/m
38	m <sub>ba</sub>	熔制每千克玻璃液所需碎玻璃量	kg/kg
39	m <sub>bs</sub>	单个料滴的质量	kg/个
40	m <sub>t</sub>	每付粉料(湿基)的质量	kg/付
41	m <sub>iq</sub>	每千克粉料(湿基)中逸出气体的质量	kg/kg
42	m <sub>is</sub>	每千克粉料(湿基)配成配合料时添加的碎玻璃量	
43	m <sub>H<sub>2</sub>O</sub>	每千克粉料中含有效水质量	
44	m <sub>H<sub>2</sub>O</sub>	每千克粉料中实测含水质量	
45	m <sub>is</sub> <sup>1)</sup>	每千克粉料(湿基)中,各种原料引入的分解氧化物质量	
46	m <sub>j</sub>	每立方米煤气中焦油含量	kg/m <sup>3</sup>

续表 A1

序号	符号代号	说 明	单 位	
47	$m_K$	进体系助燃空气质量	kg/h	
48	$m_{K_1}$	溢流气体质量		
49	$m_1$	漏入空气质量		
50	$m_b$	冷却水质量		
51	$m_p$	入窑配合料质量		
52	$m_{qt}$	出体系其他物料质量		
53	$m_r$	进体系燃料质量		
54	$m_w$	雾化介质质量		
55	$m_y$	出体系烟气质量		
56	$m_{\Sigma C}$	出体系物料总质量		
57	$m_{\Sigma s}$	进体系物料总质量		
58	$n$	测流量断面内的测点数		个
59	$n_b$	池窑表面的测点数		
60	$n_{ba}$	每小时的料滴数		个/h
61	$n_h$	每小时换向次数	次	
62	$n_p$	测定期间平均日投料付数	付/d	
63	N	燃料中氮的百分含量	%	
64	$N_2$	气体燃料中氮气的体积百分含量		
65	$N_2'$	烟气中氮气的体积百分含量		
66	O	燃料中氧的百分含量		
67	$O_2$	气体燃料中氧气的体积百分含量		
68	$O_2'$	烟气中氧气的体积百分含量		
69	$P$	大气压	Pa	
70	$\Delta P_i$	测流量断面内第 $i$ 点的动压值		
71	$P_j$	测流量断面内的静压		
72	$\Delta P_{\Sigma}$	孔口内外静压差		

续表 A1

序号	符号代号	说 明	单 位	
73	$q_i$	各种原料硅酸盐形成反应热(以千克分解氧化物计)	kJ/kg	
74	$r$	水的汽化热		
75	$Q_1$	硅酸盐形成反应耗热		
76	$Q_2$	形成玻璃液耗热		
77	$Q_3$	加热玻璃液到理论澄清温度耗热		
78	$Q_4$	蒸发有效水分耗热		
79	$Q_5$	加热去气产物到玻璃液理论澄清温度耗热		
80	$Q_6$	配合料入窑显热		
81	$Q_b$	熔成每千克玻璃液理论耗热量		
82	$Q_{bx}$	玻璃液带出显热		kJ/h
83	$Q_{bx}$	玻璃液带出潜热		
84	$Q_{bw}$	燃料低位发热量	kJ/kg	
85	$Q_{CG}$	供给热	kJ/h	
86	$Q_{hx}$	换向热损失		
87	$Q_{jr}$	焦油燃烧热		
88	$Q_{jx}$	焦油显热		
89	$Q_{Kf}$	孔口辐射散热		
90	$Q_{Kx}$	助燃空气显热		
91	$Q_{Ky}$	孔口溢流气体显热		
92	$Q_{lf}$	冷却风带出热		
93	$Q_{lw}$	冷却水带出热		kJ/h
94	$Q_{lx}$	漏入空气显热		
95	$Q_{px}$	配合料显热		
96	$Q_{qt}$	其它热损失		
97	$Q_{rh}$	燃料化学不完全燃烧热损失		
98	$Q_{rr}$	燃料燃烧热		
99	$Q_{rx}$	燃料显热		
100	$Q_{sr}$	池窑表面散热		

续表 A1

序号	符号代号	说 明	单 位
101	$Q_{m_i}$	池窑表面第 $i$ 部位的表面散热量	$\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$
102	$Q_{wq}$	雾化蒸汽潜热	$\text{kJ}/\text{h}$
103	$Q_{wx}$	雾化介质显热	
104	$Q_{yt}$	烟气显热	
105	$Q_{yz}$	有效热	
106	$Q_{zc}$	输出体系总热量	
107	$Q_{zn}$	输入体系总热量	
108	$S$	燃料中硫的百分含量	
109	$S_{bi}$	池窑表面第 $i$ 部位的表面积	$\text{m}^2$
110	$S_d$	测流量断面的截面积	
111	$S_{ki}$	窑体第 $i$ 个孔口的面积	
112	$t_{bc}$	玻璃液出体系时温度	
113	$t_{bl}$	玻璃液理论澄清温度	
114	$t_{ki}$	窑体第 $i$ 个孔口的辐射温度	
115	$t_n$	粉料入窑温度	
116	$\Delta t_i$	窑体第 $i$ 个孔口板砖的内外表面温差	
117	$t_k$	助燃空气入体系时温度	
118	$t_l$	漏入空气平均温度	
119	$t_{lf}$	吹向窑体前的冷却风温度	
120	$t'_{lf}$	吹向窑体后的反射风温度	
121	$t_{le}$	进体系时冷却水温度	
122	$t''_{le}$	出体系时冷却水温度	
123	$t_{ca}$	环境温度	
124	$t_q$	测流量断面内的气体平均温度	
125	$t_{qr}$	气体燃料入体系温度	
126	$t_r$	重油流经流量计时的温度	
127	$t_s$	碎玻璃入窑温度	

续表 A1

序号	符号代号	说 明	单 位
128	$t_{wi}$	窑体第 $i$ 部位外表面温度	℃
129	$t_{wk}$	压缩空气入体系时温度	
130	$t_y$	烟气出体系时平均温度	
131	$t_{yi}$	窑体第 $i$ 个孔口溢流气体温度	
132	$t_s$	重油入体系时温度	
133	$V_{i0}$	每千克粉料中逸出气体的体积	$m^3/kg$
134	$V_R^0$	理论空气量	$m^3/kg$ ( $m^3/m^3$ )
135	$V_{Hf}$	冷却风量	$m^3/h$
136	$V_{oK}$	进体系助燃空气量	
137	$V_{or}$	气体燃料量	
138	$V_{ow}$	雾化用压缩空气流量	
139	$V_{oy}$	出体系的烟气流量	
140	$V_r$	测定期间平均日耗油量	$m^3/d$
141	$V_{yi}$	窑体第 $i$ 个孔口的溢流气体量	$m^3/h$
142	$w_b$	玻璃原板平均拉引速度	$m/h$
143	$w_i$	测流量断面内第 $i$ 点气体流速	$m/s$
144	$X_i$	气体中各组分的体积百分含量	%
145	$\alpha$	空气系数	
146	$\alpha_c$	烟气出体系时空气系数	
147	$\alpha_i$	对流辐射换热系数	$kJ/(m^2 \cdot h \cdot ^\circ C)$
148	$\alpha_k$	烟气离开熔化部时(按各燃烧器或小炉热负荷比例)平均空气系数	
149	$\beta$	体积膨胀系数	$1/^\circ C$
150	$\delta$	窑墙厚度	m
151	$\delta_i$	板砖厚度	
152	$\epsilon_i$	窑墙第 $i$ 部位外表面黑度	
153	$\epsilon_m$	金属板黑度	
154	$\eta$	池窑热效率	%
155	$\lambda$	板砖的导热系数	$W/(m \cdot ^\circ C)$

续表 A1

序号	符号代号	说 明	单 位
156	$\mu_i$	窑体第 $i$ 个孔口的溢流系数	
157	$\rho_0$	标准状态下气体的密度	kg/m <sup>3</sup>
158	$\rho_{0i}$	标准状态下气体中各组分的密度	
159	$\rho_{20}$	20℃时重油的密度	
160	$\rho_t$	重油流经流量计时的密度	
161	$\tau$	换向时,窑内停火时间	s
162	$\phi_i$	门孔系数	

注: 1) 各种原料引入的分解氧化物量,即参加硅酸盐反应的分解氧化物量。

### 附 录 B

#### 燃料低位发热量的计算

(补充件)

#### B1 液体燃料低位发热量 $Q_{Dw}^Y$ , kJ/kg

##### B1.1 已知燃料的元素分析时:

$$Q_{Dw}^Y = 339C' + 1030H' - 109(O' - S') - 25W' \dots\dots\dots (B1)$$

式中:  $C'$ 、 $H'$ 、 $O'$ 、 $S'$ 、 $W'$ ——分别表示应用基时燃料中碳、氢、氧、硫、水的百分含量。

##### B1.2 已知重油的相对密度时,可查表 B1 得到重油的低位发热量。

表 B1 重油相对密度和低位发热量的关系

相对密度 $d_{15}^{15}$	低位发热量 $Q_{Dw}^Y$ kJ/kg	相对密度 $d_{15}^{15}$	低位发热量 $Q_{Dw}^Y$ kJ/kg
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	405 19.7	0.910 0	41 983.3
1.007 1	406 45.2	0.904 2	42 025.1
1.000 0	407 28.8	0.893 4	42 108.7
0.993 0	408 54.2	0.892 7	42 192.3
0.986 1	409 37.9	0.887 1	42 276.0
0.979 2	410 21.5	0.881 6	42 317.8
0.972 5	411 46.9	0.876 2	42 401.4
0.965 9	412 30.6		

注: 1)  $d_{15}^{15}$  为 15℃时重油密度与 15℃时水的密度之比。



B1.3 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。测试和计算按照 GB 384 进行。

B2 气体燃料低位发热量  $Q_{Dw}^Y$ , kJ/m<sup>3</sup>

$$Q_{Dw}^Y = 126CO + 108H_2 + 358CH_4 + 590C_2H_4 + 637C_2H_6 + 806C_3H_6 + 912C_3H_8 + 1187C_4H_{10} + 1460C_5H_{12} + 232H_2S \dots\dots\dots(B2)$$

式中: CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>, C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>, C<sub>5</sub>H<sub>12</sub>, H<sub>2</sub>S——气体燃料中各可燃组份的体积百分含量。

附录 C  
理论空气量、烟气量及空气系数计算  
(补充件)

C1 理论空气量  $V_k^o$  与理论烟气量  $V_y^o$  的计算方法可采用近似算法。

C1.1 液体燃料理论空气量  $V_k^o$ , m<sup>3</sup>/kg, 理论烟气量  $V_y^o$ , m<sup>3</sup>/kg

$$V_k^o = \frac{0.203Q_{Dw}^Y}{1000} + 2 \dots\dots\dots(C1)$$

$$V_y^o = \frac{0.265Q_{Dw}^Y}{1000} \dots\dots\dots(C2)$$

C1.2 气体燃料理论空气量  $V_k^o$ , m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>, 理论烟气量  $V_y^o$ , m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>

C1.2.1 煤气

当  $Q_{Dw}^Y < 12500$  kJ/m<sup>3</sup> 时:

$$V_k^o = \frac{0.209Q_{Dw}^Y}{1000} \dots\dots\dots(C3)$$

$$V_y^o = \frac{0.173Q_{Dw}^Y}{1000} \dots\dots\dots(C4)$$

当  $Q_{Dw}^Y > 12500$  kJ/m<sup>3</sup> 时:

$$V_k^o = \frac{0.26Q_{Dw}^Y}{1000} - 0.25 \dots\dots\dots(C5)$$

$$V_y^o = \frac{0.272Q_{Dw}^Y}{1000} + 0.25 \dots\dots\dots(C6)$$

C1.2.2 天然气

$$V_k^0 = \frac{0.2639Q_{DW}^Y}{1000} + 0.02 \quad \dots\dots\dots(C7)$$

$$V_y^0 = \frac{0.2639Q_{DW}^Y}{1000} + 1.02 \quad \dots\dots\dots(C8)$$

C2 空气系数计算

C2.1 燃料中含氮量与助燃空气中含氮量比较很少(如固体、液体燃料)时:

$$\alpha = \frac{N_2'}{N_2' - (O_2' - \frac{1}{2}CO' - \frac{1}{2}H_2' - 2CH_4') \times \frac{79}{21}} \quad \dots\dots\dots(C7)$$

式中:  $N_2'$ 、 $O_2'$ 、 $CO'$ 、 $H_2'$ 、 $CH_4'$ ——分别表示烟气中氮气、氧气、一氧化碳、氢气和甲烷的体积百分含量。

C2.2 燃料中含氮量较高(如发生炉煤气)时:

$$\alpha = \frac{N_2' - N_2^i}{(N_2' - N_2^i) - (O_2' - \frac{1}{2}CO' - \frac{1}{2}H_2' - 2CH_4') \times \frac{79}{21}} \quad \dots\dots\dots(C8)$$

式中:  $N_2^i$ ——燃料中引入的氮气占烟气中的体积百分含量。

$$N_2^i = \frac{N_2 \times (CO_2' + SO_2' + CO' + CH_4' + \sum_n C_n H_m')}{CO_2 + CO + CH_4 + \sum_n C_n H_m + H_2S} \quad \dots\dots\dots(C9)$$

式中:  $N_2$ 、 $CO_2$ 、 $CO$ 、 $CH_4$ 、 $\sum_n C_n H_m$ 、 $H_2S$ ——气体燃料中各组分的体积百分含量。

附录 D

玻璃液理论澄清温度和平均比热容计算  
(补充件)

D1 玻璃液理论澄清温度计算

D1.1 平板玻璃

采用奥霍金温度-粘度计算方法,先求出粘度为  $10^2 Pa \cdot s$ 、 $10^3 Pa \cdot s$  时的玻璃液温度值,然后用下式计算玻璃液粘度为  $10 Pa \cdot s$  时的理论澄清温度值:

$$T_{10} = \frac{1}{\frac{2}{T_{10}^2} - \frac{1}{T_{10}^3}} \quad \dots\dots\dots(D1)$$

式中:  $T_{10}$ ——玻璃液理论澄清温度,℃;

$T_{10^2}$  —— 玻璃液粘度为  $10^2 \text{ Pa} \cdot \text{s}$  时的温度值,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$T_{10^3}$  —— 玻璃液粘度为  $10^3 \text{ Pa} \cdot \text{s}$  时的温度值,  $^{\circ}\text{C}$ 。

奥霍金温度-粘度计算方程式为:

$$T = ax + by + cz + D + \delta\Delta\text{MgO} \quad \dots\dots\dots(\text{D2})$$

式中:  $T$  —— 粘度  $10^2 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 、 $10^3 \text{ Pa} \cdot \text{s}$  时的温度值,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$x, y, z$  —— 分别为  $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $(\text{CaO} + \text{MgO})$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量百分数;

$a, b, c, D$  —— 分别为  $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $(\text{CaO} + \text{MgO})$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{SiO}_2$  的特性常数, 见表 D1;

$\delta$  —— 当  $\text{MgO}$  的含量不是 3% 时的校正值, 见表 D1;

$\Delta\text{MgO}$  —— 实际含  $\text{MgO}$  百分数与 3% 的差值。

表 D1 相应粘度的特性常数和校正值

粘度值 $\text{Pa} \cdot \text{s}$	$a$	$b$	$c$	$D$	$\delta$
$10^2$	-22.87	-16.10	6.50	1 700.40	9.0
$10^3$	-17.49	-9.95	5.90	1 381.40	6.0

注: 采用奥霍金法时, 玻璃成分应换算成只含  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$  的百分含量, 换算时  $\text{Fe}_2\text{O}_2$  加到  $\text{Al}_2\text{O}_3$  上,  $\text{K}_2\text{O}$  加到  $\text{Na}_2\text{O}$  上。

**D1.2 日用玻璃**

$$T_{10} = T_0 + \frac{B}{20 - A} \quad \dots\dots\dots(\text{D3})$$

式中:  $T_0, A, B$  —— 与玻璃组分有关的特性常数。

求解特性常数 ( $T_0, A, B$ ) 用方程式:

$$(-A \cdot T_0 + B) + (\log\eta)T_0 + AT = (\log\eta)T \quad \dots\dots\dots(\text{D4})$$

式中:  $T$  —— 玻璃液温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$\log\eta$  ——  $T$   $^{\circ}\text{C}$  温度下, 玻璃液粘度 ( $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ) 的对数值。

$$\begin{aligned} \log\eta = & b_1 + b_2 \cdot \text{Na}_2\text{O} + b_3 \cdot \text{K}_2\text{O} + b_4 \cdot \text{CaO} + b_5 \cdot \text{MgO} \\ & + b_6 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 + b_7 \cdot \sqrt{\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{K}_2\text{O}} + b_8 \cdot \text{Na}_2\text{O} \cdot \text{CaO} \\ & + b_9 \cdot \text{Na}_2\text{O} \cdot \text{MgO} + b_{10} \cdot \text{K}_2\text{O} \cdot \text{CaO} + b_{11} \cdot \text{K}_2\text{O} \cdot \text{MgO} \\ & + b_{12} \cdot \text{CaO} \cdot \text{MgO} + b_{13} \cdot (\text{CaO})^2 + b_{14} \cdot (\text{MgO})^2 \\ & + b_{15} \cdot \text{BaO} \cdot (\text{CaO} + \text{MgO}) + b_{16} \cdot \text{Ld}_2\text{O} \\ & + b_{17} \cdot \text{Li}_2\text{O} \cdot (\text{CaO} + \text{MgO} + \text{BaO}) + b_{18} \cdot \text{B}_2\text{O}_3 \\ & + b_{19} \cdot \text{B}_2\text{O}_3 \cdot (\text{CaO} + \text{MgO} + \text{BaO}) + b_{20} \cdot \text{F}_2 \quad \dots\dots\dots(\text{D5}) \end{aligned}$$

式中:  $b_1 \dots\dots b_{20}$  —— 计算因数, 见表 D2;

$\text{Na}_2\text{O}, \text{K}_2\text{O}, \text{CaO}, \text{MgO}, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{BaO}, \text{Li}_2\text{O}, \text{B}_2\text{O}_3, \text{F}_2$  —— 玻璃组分百分含量的 1/10。

具体计算见表 D2:

表 D2 玻璃组分在 700, 1 000, 1 300℃ 时的计算因数

组 分	组分值 (组分百分含量×0.1)	计 算 因 数						
		$b_i$	700℃	组分值× $b_i$	1 000℃	组分值× $b_i$	1 300℃	组分值× $b_i$
截距值	1.000		89.040	89.040	52.559	52.559	36.486	36.486
Na <sub>2</sub> O			-9.424		-6.535		-5.436	
K <sub>2</sub> O			-6.498		-3.336		-3.235	
CaO			20.773		7.104		2.385	
MgO			33.705		21.023		7.012	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			9.293		3.896		2.539	
$\sqrt{\text{Na}_2\text{OK}_2\text{O}}$			-1.548		-0.323		0.260	
Na <sub>2</sub> O·CaO			-9.619		-4.816		-2.936	
Na <sub>2</sub> O·MgO			-12.709		-8.889		-2.089	
K <sub>2</sub> O·CaO			-4.349		-2.923		-2.330	
K <sub>2</sub> O·MgO			-6.068		-2.462		1.992	
CaO·MgO			-17.221		-9.721		-6.417	
(CaO) <sup>2</sup>			-1.791		-2.013		-1.817	
(MgO) <sup>2</sup>			-3.515		-5.366		-4.204	
BaO·(CaO+MgO)			-7.710		-4.760		-3.330	
Li <sub>2</sub> O			-26.020		-13.180		-10.710	
Li <sub>2</sub> O·(CaO+MgO+BaO)			-35.160		-17.090		-7.240	
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			4.670		-9.250		-7.540	
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (CaO+MgO+BaO)			-10.750		-1.690		1.010	
F <sub>2</sub>			-47.950		-18.120		-13.03	
合 计			T = 700℃时; log7 =		T = 1 000℃时; log7 =		T = 1 300℃时; log7 =	

将表中计算出的 700, 1 000, 1 300℃时的  $\log\eta$  值分别代入式(D4)得到三个联立方程式, 解联立方程式得  $T_0$ 、 $A$ 、 $B$  三个特性常数, 然后代入式(D3)求得玻璃液理论澄清温度  $T_{10}$ 。

D1.3 光学玻璃

$$T_{10} = 1\,400 + W_a S_a + W_b S_b + \dots + W_n S_n \quad \dots\dots\dots (D6)$$

式中:  $W_a, W_b, \dots, W_n$  ——玻璃中各种氧化物的百分含量;  
 $S_a, S_b, \dots, S_n$  ——各种氧化物的校正系数, 查表 D3。

表 D3 各种氧化物的校正系数

氧化物	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	R <sub>2</sub> O	BaO	CaO	ZnO	MgO	PbO
校正系数	SiO <sub>2</sub> < 60% + 5	+7	-7	-11	BaO < 18% - 5	-5	-3.5	-2	-3.5
	SiO <sub>2</sub> = 60% ~ 70% + 4.7				BaO = 18% ~ 25% - 4				
	SiO <sub>2</sub> > 70% + 4.3								

D1.4 电子玻璃

D1.4.1 根据实测高温粘度, 并采用  $\log\eta - \frac{1}{t}$  直线外推法求得玻璃液粘度为 10 Pa·s 时的理论澄清温度值。

D1.4.2 实测高温粘度困难时, 用式(D7)计算:

$$T_{10} = 1\,240 + 40K \quad \dots\dots\dots (D7)$$

式中:  $K$  ——玻璃的融熔系数, 按(D8)或(D9)式计算。

当 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> < 15% 时:

$$K = \frac{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{ZrO}_2}{2.0\text{F}_2 + 1.5\text{Li}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} + 0.75\text{K}_2\text{O} + 0.50\text{B}_2\text{O}_3 + 0.25\text{PbO} + 0.20\text{BaO}} \quad \dots\dots\dots (D8)$$

当 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> > 15% 时:

$$K = \frac{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{ZrO}_2}{2.0\text{F}_2 + 1.5\text{Li}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} + 0.75\text{K}_2\text{O} + 0.25\text{B}_2\text{O}_3 + 0.25\text{PbO} + 0.20\text{BaO}} \quad \dots\dots\dots (D9)$$

式中: SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ZrO<sub>2</sub>, F<sub>2</sub>, Li<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O, B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, PbO, BaO ——分别为玻璃中该组分的百分含量。

D2 玻璃液平均比热容计算

采用夏普法计算:

$$c_b = \frac{1}{0.001\,46t + 1} [P_1(a_1t + c_1) + P_2(a_2t + c_2) + \dots + P_i(a_it + c_i)] \quad \dots\dots (D10)$$

式中:  $t$  ——玻璃液温度, ℃;

$c_b$  ——  $0 \sim t$  °C时玻璃液平均比热容, kJ/(kg·°C);

$P_1, P_2 \dots P_i$  —— 玻璃成分中各种氧化物的百分含量;

$a_1, a_2 \dots a_i$  —— 常数, 见表 D4;

$c_1, c_2 \dots c_i$  —— 常数, 见表 D4。

表 D4 夏普比热容计算常数表

氧化物 常数	SiO <sub>2</sub>	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	MgO	CaO	PbO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O
$a_i$	0.001 96	0.002 50	0.001 90	0.003 48	0.002 15	0.001 72	0.000 05	0.003 47	0.001 86
$c_i$	0.693 8	0.810 1	0.739 0	0.791 3	0.896 8	0.715 5	0.205 2	0.933 2	0.735 2

附 录 E

记录、测定事项一览表

(参考件)

表 E1 玻璃池窑基本情况记录表

厂 名			
厂 址			
池窑类型			
保温情况			
燃料种类			
产品种类			
序号	项 目	单 位	数 值
1	熔化部长×宽×深	m	
2	熔化部面积	m <sup>2</sup>	
3	工作部面积或冷却部面积		
4	投料池长×宽	m	
5	小炉喷火口总宽		
6	小炉对数	对	
7	卡脖长×宽或流液洞长×宽×高	m	
8	一组蓄热室格子体高×宽×长		
9	总换热面积	m <sup>2</sup>	
10	每平方米熔化部面积占换热面积	m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>	

表 E2 玻璃池窑主要技术经济指标

序号	项 目	单 位	设计值	实际值
1	熔化能力	t/d		
2	熔化率	t/m <sup>2</sup> ·d		
3	燃料消耗量	t/d		
4	每公斤玻璃液热耗	kJ/kg		

表 E3 玻璃成分

氧化物 玻璃成分	SiO <sub>2</sub>	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	PbO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O
	设计玻璃成分, %								
分析玻璃成分, %									

表 E4 原料成分和料方

原料名称	每付料重 kg	SiO <sub>2</sub>	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	BaO	PbO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	I·L (烧失量)
硅砂(砂岩)	$m_1$											
	$m_i$											
	$m_n$											
水分	$m_{n+1}$											
合 计	$\sum_{i=1}^{n+1} m_i$											

注：① 水分： $m_{n+1}$  包括原料中原有水分和外加水。

② 含水量:  $m'_{H_2O} = \frac{m_{n+1}}{\sum_{i=1}^{n+1} m_i}$

③ 含碎玻璃量:  $m_{fs} = \frac{\text{碎玻璃量}}{\sum_{i=1}^{n+1} m_i}$

表 E5 热平衡实测数据综合表

测定人员							
测定时间	起 年 月 日						
	止 年 月 日						
测定项目				单位	数值		
燃料	重油	流量 $V_r$			$m^3/h$		
		温度 $t_r$			$^{\circ}C$		
		密度 $\rho_r$			$kg/m^3$		
		应用基低位发热量 $Q_{Dw}^Y$			$kJ/kg$		
		组成	C			%	
			H				
			O				
			N				
			S				
			A				
	W(含水率)						
	煤气	静压 $P_i$			Pa		
		动压(平均值) $\frac{\sum_{i=1}^n \sqrt{\Delta P_i}}{n}$					
		测流量断面的截面积 $S_d$			$m^2$		
密度 $\rho_o$			$kg/m^3$				
流量 $V_{or}$			$m^3/h$				
温度 $t_{\varphi}$			$^{\circ}C$				
应用基低位发热量 $Q_{Dw}^Y$			$kJ/m^3$				



续表 E5

		测 定 项 目		单 位	数 值
燃料	煤气	组成	CO	%	
			CH <sub>4</sub>		
			H <sub>2</sub>		
			C <sub>n</sub> H <sub>m</sub>		
			CO <sub>2</sub>		
			O <sub>2</sub>		
			N <sub>2</sub>		
			H <sub>2</sub> O		
			焦油含量 $m_1$	kg/m <sup>3</sup>	
助燃空气		静压 $P_j$	Pa		
		动压(平均值) $\frac{\sum_{i=1}^n \sqrt{\Delta P_i}}{n}$			
		测流量断面的截面积 $S_d$	m <sup>2</sup>		
		温度 $t_k$	℃		
		流量 $V_{ok}$	m <sup>3</sup> /h		
雾化介质		种类			
		温度 $t_{wk}$ (或压力 $P_w$ )	℃ (Pa)		
		流量 $V_{ow}$ (或 $m_w$ )	m <sup>3</sup> /h (kg/h)		
漏入空气		烟气出体系时空气系数 $a_c$			
		烟气离开熔化部时(按各燃烧器或小炉热负荷比例)平均空气系数 $a_k$			
		理论空气量 $V_k^0$	m <sup>3</sup> /kg (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )		
		温度 $t_1$	℃		

续表 E5

测 定 项 目		单 位	数 值	
配合料	温度 $t_n, t_s$	℃		
	用量 $m_p$	kg/h		
	含水量 $m'_{H_2O}$	kg/kg		
	测定期间平均日投料付数 $n_p$	付/d		
	每付粉料(湿基)的质量 $m_t$	kg/付		
玻璃液	出体系时温度 $t_{bc}$	℃		
	玻璃原板平均每米质量 $m_{bp}$	kg/m		
	单个料滴的质量 $m_{bs}$	kg/个		
	每小时的料滴数 $n_{bs}$	个/h		
	玻璃液质量 $m_b$	kg/h		
	理论澄清温度 $t_{bl}$	℃		
烟气	静压 $P_j$	Pa		
	动压(平均值) $\frac{\sum_{i=1}^n \sqrt{\Delta P_i}}{n}$			
	密度 $\rho_0$	kg/m <sup>3</sup>		
	温度 $t_y$	℃		
	测量断面的截面积 $S_d$	m <sup>2</sup>		
	流量 $V_{or}$	m <sup>3</sup> /h		
	组成	CO'	%	
		CO <sub>2</sub> '		
		O <sub>2</sub> '		
		N <sub>2</sub> '		
		H <sub>2</sub> O'		

续表 E5

测 定 项 目		单 位	数 值	
冷却水	温度 $t_w, t'_w$	℃		
	流量 $m_w$	kg/h		
冷却风	静压 $P_i$	Pa		
	动压(平均值) $\frac{\sum \sqrt{\Delta P_i}}{n}$			
	温度 $t_H, t'_H$	℃		
	测流量断面的截面积 $S_d$	$m^2$		
	流量 $V_H$	$m^3/h$		
孔口溢流气体	孔口内外静压差 $\Delta P_{K_i}$	Pa		
	温度 $t_{K_i}$	℃		
	孔口面积 $S_{K_i}$	$m^2$		
	溢流气体量 $V_{K_i}$	$m^3/h$		
	组成	CO'	%	
		H <sub>2</sub> '		
		CH <sub>4</sub> '		
		CO <sub>2</sub> '		
		O <sub>2</sub> '		
		N <sub>2</sub> '		
		H <sub>2</sub> O'		
	表面散热	测点数 $n_b$	个	
		表面积 $S_w$	$m^2$	
表面散热量 $Q_{sri}$		$kJ/(m^2 \cdot h)$		
表面温度 $t_{wi}$		℃		
环境温度 $t_{oi}$				
表面黑度 $\epsilon_i$				
位置系数 $A_w$				

续表 E5

测定项目		单位	数值
孔口辐射	孔内温度 $t_i$	℃	
	环境温度 $t_w$		
	孔口面积 $S_{K_i}$	$m^2$	
	孔口系数 $\phi$		
大气压 $P$		Pa	

附录 F

每千克粉料(湿基)逸出气体产物量和形成氧化物量计算  
(参考件)

F1 每千克粉料(湿基)逸出气体产物量计算  
见表 F1。

表 F1 逸出气体产物量计算

原料名称	逸出气体产物量计算式	逸出气体产物量					
		CO <sub>2</sub>	NO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	O <sub>2</sub>	合计
硅砂	$m_{CO_2} = m_1 / \sum_{i=1}^{n+1} m_i \times I \cdot L\%$						
水	$m_{H_2O} = m_{n+1} / \sum_{i=1}^{n+1} m_i$						
合计(kg/kg)							$m_{tq}$
体积 = $\frac{\text{重量}}{\text{分子量}} \times 22.4$							$V_{tq}$
体积百分数, %							100

注: ① 其他原料逸出气体产物见附录 G 表 G4。



附录 G  
各类数据表  
(参考件)

表 G1 常用气体的一般性质表

名称	分子式	分子量	密度 $\rho_0$ kg/m <sup>3</sup>	低位发热量 $Q_{Dw}^Y$ kJ/m <sup>3</sup>
甲烷	CH <sub>4</sub>	16.04	0.717	$3.57 \times 10^4$
乙烷	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	30.07	1.356	$0.36 \times 10^4$
乙烯	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	28.05	1.261	$5.90 \times 10^4$
乙炔	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	26.04	1.171	$5.60 \times 10^4$
丙烷	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	44.09	2.004	$9.11 \times 10^4$
丙烯	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	42.08	1.915	$8.59 \times 10^4$
丁烷	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	58.12	2.703	$11.8 \times 10^4$
丁烯	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	56.10	2.500	$11.3 \times 10^4$
戊烷	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	72.14	3.457	$14.6 \times 10^4$
硫化氢	H <sub>2</sub> S	34.08	1.539	$2.33 \times 10^4$
一氧化碳	CO	28.01	1.250	$1.26 \times 10^4$
氢	H <sub>2</sub>	2.02	0.090	$1.08 \times 10^4$
二氧化碳	CO <sub>2</sub>	44.01	1.965	
二氧化硫	SO <sub>2</sub>	64.06	2.850	
三氧化硫	SO <sub>3</sub>	80.06	3.575	
水蒸汽	H <sub>2</sub> O	18.01	0.804	
氧	O <sub>2</sub>	32.0	1.429	
氮	N <sub>2</sub>	28.02	1.251	
空气(干)		28.96	1.293	

表 G2 常用气体的平均定压比热容  $c_p$  [kJ/(m<sup>3</sup>·°C)]

温 度 °C	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	空气(干)	H <sub>2</sub>	CO	H <sub>2</sub> S	SO <sub>2</sub>
0	1.593	1.293	1.305	1.494	1.295	1.277	1.302	1.264	1.733
100	1.713	1.296	1.317	1.506	1.300	1.290	1.302	1.541	1.813
200	1.796	1.300	1.338	1.522	1.308	1.298	1.311	1.574	1.888
300	1.871	1.306	1.357	1.542	1.318	1.302	1.319	1.608	1.959
400	1.938	1.317	1.378	1.565	1.329	1.302	1.331	1.645	2.018
500	1.997	1.329	1.398	1.585	1.343	1.306	1.344	1.683	2.073
600	2.049	1.341	1.417	1.613	1.357	1.311	1.361	1.721	2.114
700	2.097	1.354	1.432	1.641	1.371	1.315	1.373	1.759	2.152
800	2.140	1.367	1.450	1.668	1.385	1.319	1.390	1.796	2.186
900	2.179	1.380	1.465	1.696	1.398	1.323	1.403	1.830	2.215
1 000	2.214	1.392	1.478	1.722	1.410	1.327	1.415	1.863	2.240
1 100	2.245	1.404	1.490	1.750	1.422	1.336	1.428	1.892	2.261
1 200	2.275	1.415	1.501	1.777	1.433	1.344	1.440	1.922	2.278
1 300	2.301	1.426	1.511	1.803	1.444	1.352	1.449	1.947	
1 400	2.325	1.436	1.520	1.824	1.454	1.361	1.461	1.972	
1 500	2.345	1.446	1.529	1.853	1.463	1.369	1.465	1.997	
1 600	2.368	1.454	1.538	1.877	1.472	1.378	1.470		
1 700	2.387	1.458	1.546	1.900	1.480	1.386	1.478		
1 800	2.405	1.470	1.554	1.922	1.487	1.394	1.486		

表 G3 烃类气体的平均定压比热容  $c_p$  [kJ/(m<sup>3</sup>·°C)]

温 度 °C	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>
0	1.566	1.871	1.716	2.178	3.069	3.831	4.207	5.212
100	1.658	2.047	2.106	2.504	3.533	4.295	4.752	5.924
200	1.767	2.185	2.328	2.797	4.140	4.743	5.233	6.631
300	1.892	2.290	2.529	3.077	4.400	5.162	5.715	7.293
400	2.022	2.370	2.721	3.337	4.798	5.564	6.196	7.929
500	2.144	2.437	2.893	3.571	5.129	5.916	6.627	8.474
600	2.269	2.508	3.048	3.806	5.455	6.271	7.058	9.022
700	2.357	2.575	3.190	4.015	5.769	6.589	7.452	9.319
800	2.470	2.629	3.341	4.207	6.041	6.887	7.812	9.901
900	2.596	2.684	3.450	4.379	6.305	7.159	8.139	10.265
1 000	2.709	2.734	3.567	4.542	6.523	7.410	8.444	10.600

表 G4 各种硅酸盐形成反应热

序号	组 分		分解氧化物	最后产物	耗热量(kJ/kg)		逸出气体产物	气体数量(标 m <sup>3</sup> /kg)		比 率	
	名称	分子式			以千克分解氧化物计	以千克组分计		以千克分解氧化物计	以千克组分计	组分/分解氧化物	分解氧化物/组分
1	石灰石	CaCO <sub>3</sub>	CaO	CaSiO <sub>3</sub>	1 536.6	860.4	CO <sub>2</sub>	0.400	0.224	1.785	0.560
2	纯 碱	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	951.7	556.8	CO <sub>2</sub>	0.360	0.210	1.710	0.585
3	芒 硝	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Na <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	3 467.1	1 514.0	SO <sub>2</sub> +CO <sub>2</sub>	0.363 +0.180	0.158 +0.079	2.290	0.437
4	硝酸钠	NaNO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	4 144.9	1 507.3	NO <sub>2</sub> +O <sub>2</sub>				
5	冰晶粉	Na <sub>3</sub> AlF <sub>6</sub>	Na <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	951.7		F				
6	碳酸钾	K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	996.5	678.7	CO <sub>2</sub>	0.236	0.160	1.470	0.680
7	硝 石	KNO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	3 166.1	1 473.3	N <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.239	0.111	2.150	0.465
8	菱镁石	MgCO <sub>3</sub>	MgO	MgSiO <sub>3</sub>	3 466.7	1 657.1	CO <sub>2</sub>	0.553	0.264	2.090	0.479
9	白云石	CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	CaO+MgO	CaMg(SiO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	2 757.4	1 441.5	CO <sub>2</sub>	0.463	0.241	1.913	0.523
10	硼 酸	H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3 018.7	1 693.6	H <sub>2</sub> O	0.960	0.541	1.770	0.565
11	硼 砂	Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> ·10H <sub>2</sub> O	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	1 364.9		H <sub>2</sub> O				
12	碳酸钡	BaCO <sub>3</sub>	BaO	BaSiO <sub>3</sub>	988.1	768.3	CO <sub>2</sub>	0.146	0.013	1.290	0.775
13	硝酸钡	Ba(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	BaO	BaSiO <sub>3</sub>	2 260.9	1 327.2	N <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.146	0.085	1.710	0.585
14	硫酸钡	BaSO <sub>4</sub>	BaO	BaSiO <sub>3</sub>	2 260.9						
15	红 丹	PbO		PbSiO <sub>3</sub>	1 256.0						
16	氢氧化铝	Al(OH) <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1 766.8	1 155.6	H <sub>2</sub> O	0.656	0.430	1.530	0.655

注：萤石(分子式:CaF<sub>2</sub>)的硅酸盐形成反应热可以按石灰石的值计算。



附录 H  
烟气中水分含量测定方法  
(参考件)

H1 原理

从烟道中抽出一定体积的烟气,使之通过装有吸湿剂的 U 型管,烟气中的水分被吸湿剂吸收。U 型管的增重即为已知体积烟气中含有的水分量。

H2 测定装置

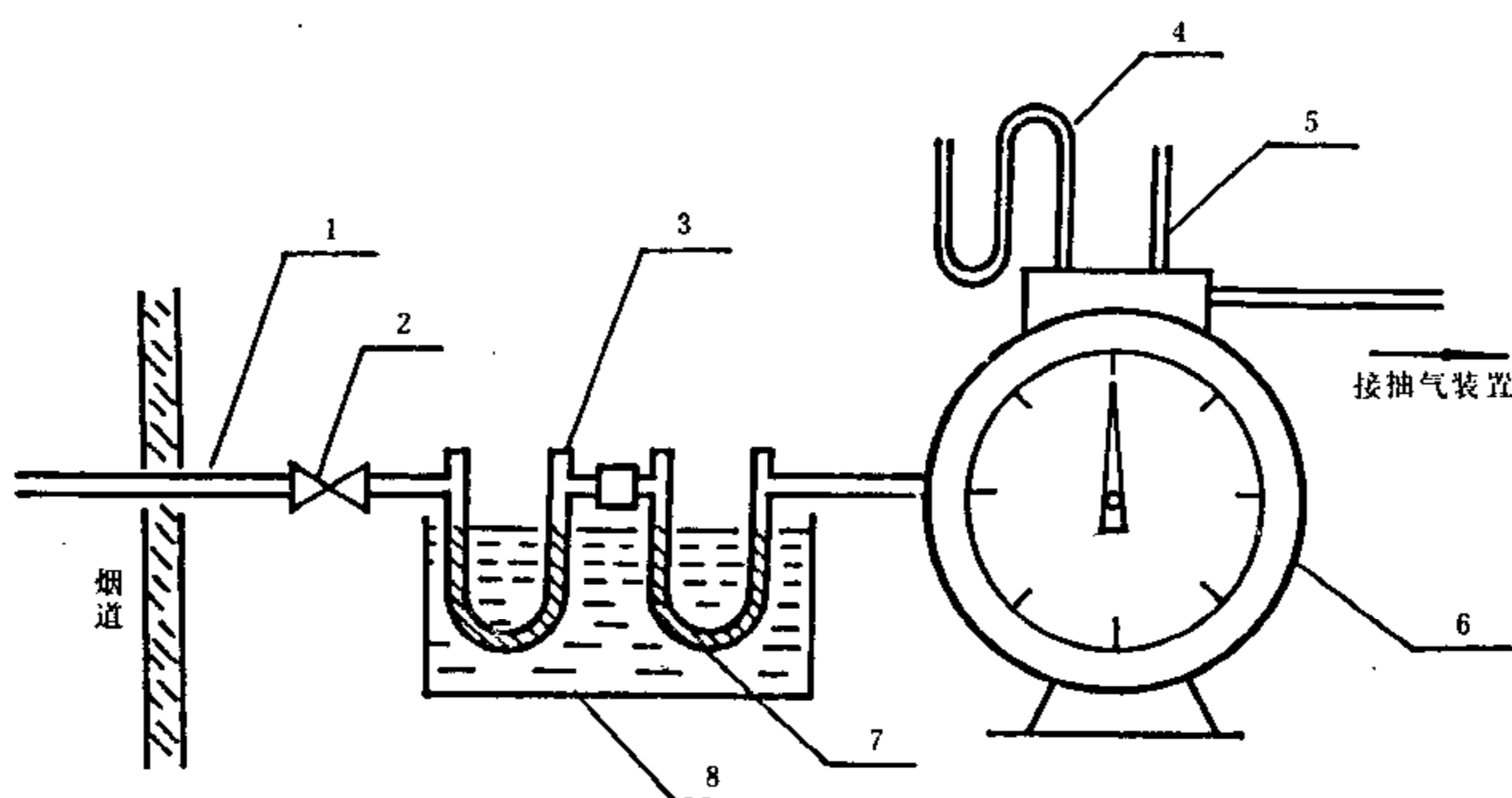


图 H1 水分测量采样装置图

1—采样管;2—进口阀;3—U 型管;4—压力计;5—温度计;  
6—流量计;7—吸湿剂;8—冷却器

H3 测定步骤

H3.1 将粒状吸湿剂(如无水氯化钙、硅胶等)装入 U 型管内,吸湿剂上面要填充少量玻璃棉,以防止吸湿剂的飞散,封闭 U 型管管口,擦去表面的附着物,用分析天平称重。

H3.2 取样装置按图 H1 连接,检查系统无漏气现象后,打开 U 型管进口阀,以 1 L/min 的流量抽气。采样后,关闭进口阀,取下 U 型管,擦去表面的附着物,用分析天平称重。

H4 计算公式

$$W_y = \frac{\frac{22.4}{18} m_w}{\frac{22.4}{18} \times m_w + V_y \times \frac{P_i + P}{101325} \times \frac{273}{273 + t_y}} \times 100 \quad \dots\dots\dots(H1)$$

式中:  $W_y$  ——烟气中水分的体积百分含量, %;

$m_w$  ——吸湿剂吸收的水量, g;

$V_y$  ——流量计显示的烟气流量, L;

$P_j$  —— 压力计显示的烟气静压, Pa;  
 $P$  —— 大气压, Pa;  
 $t_y$  —— 温度计显示的烟气温度, °C。

**H5 注意事项**

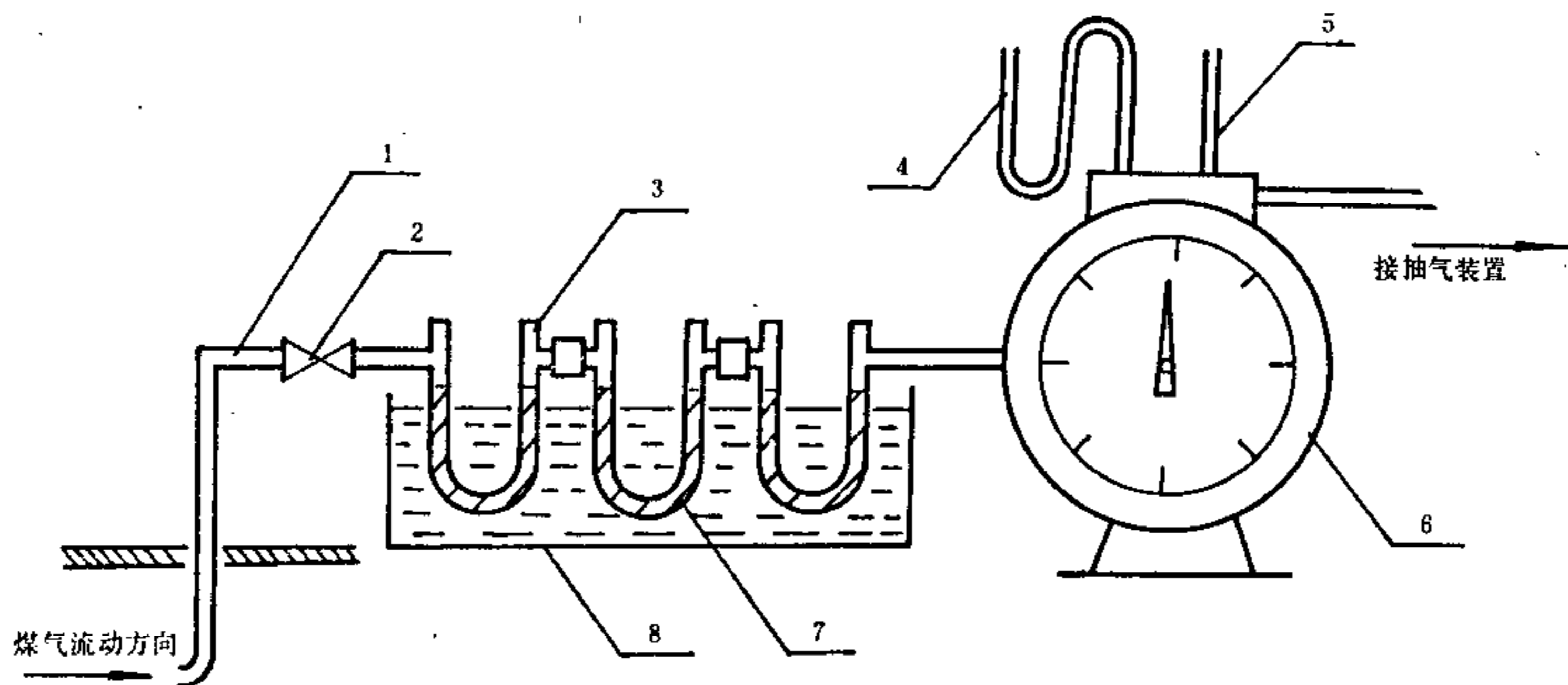
- H5.1 采样前应检查整个采样系统,使之不存在漏气现象。
- H5.2 采样管应插入烟道截面中部。
- H5.3 烟气自烟道内抽出到进入 U 型管的距离应尽量短,注意加热和保温,使烟气温度在露点温度以上。
- H5.4 抽气装置的抽力要保持稳定。
- H5.5 U 型管外表面擦干,不要经高温烘干。

**附录 I**  
**煤气中焦油、水分含量的测定方法**  
 (参考件)

**I1 原理**

从煤气管道中抽出一定体积的煤气,使之经过装有脱脂棉的 U 型管,煤气中的水分、焦油、灰分被冷凝、过滤在 U 型管中,U 型管的增重即为已知体积煤气中的水分、焦油、灰分量,然后用甲苯蒸发水分,用丙酮溶解焦油的方法求得水分、焦油各自的量。

**I2 测定装置**



**图 I1 煤气采样装置图**  
 1—采样管;2—进口阀;3—U 型管;4—压力计;5—温度计;  
 6—流量计;7—脱脂棉;8—冷却器

13 测定步骤

13.1 用分析天平称出 U 型管重  $m_1$ 、烘干后的脱脂棉重  $m_2$ ，将脱脂棉  $m_2$  疏松地放入 U 型管中并密封待用。

13.2 取样装置按图 I1 连接，先将采样管弯头背对气流方向，检查无漏气现象后，把采样管弯头对准气流方向，打开进口阀，开始抽气。

13.3 采完样后，擦干 U 型管外附着物，用分析天平称重，得总质量  $m_0$ 。

再用已烘干、称量的脱脂棉将采样管内壁物质擦下收集后称重，减去脱脂棉重得到采样管内样品重  $m_3$ 。

13.4 样品总质量  $m_{yp}$ ，g

$$m_{yp} = m_0 - (m_1 + m_2) + m_3 \quad \dots\dots\dots(I1)$$

13.5 将全部样品放入一个烧瓶中，并用甲苯将 U 型管冲洗干净，洗下的溶液也倒入烧瓶中，然后按图 I2 将水分测定仪安装好、加热。加热到 110℃ 时甲苯沸腾，烧瓶内的水分和甲苯成蒸汽逸出，在冷凝管中被冷凝后，收集在承接管中，水在承接管下部，甲苯在水的上面、二者有明显的分界面。当水分全部蒸发完后，从承接管的刻度可得水的体积，换算成水分的质量  $m'_{st}$ ，然后从表 I1 中查出实际的含水量  $m_{st}$ 。

表 I1 甲苯蒸发水分的校正值 单位：g

$m'_{st}$	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$m_{st}$	1.92	2.92	3.94	4.94	5.94	6.92	7.92	8.92	9.92

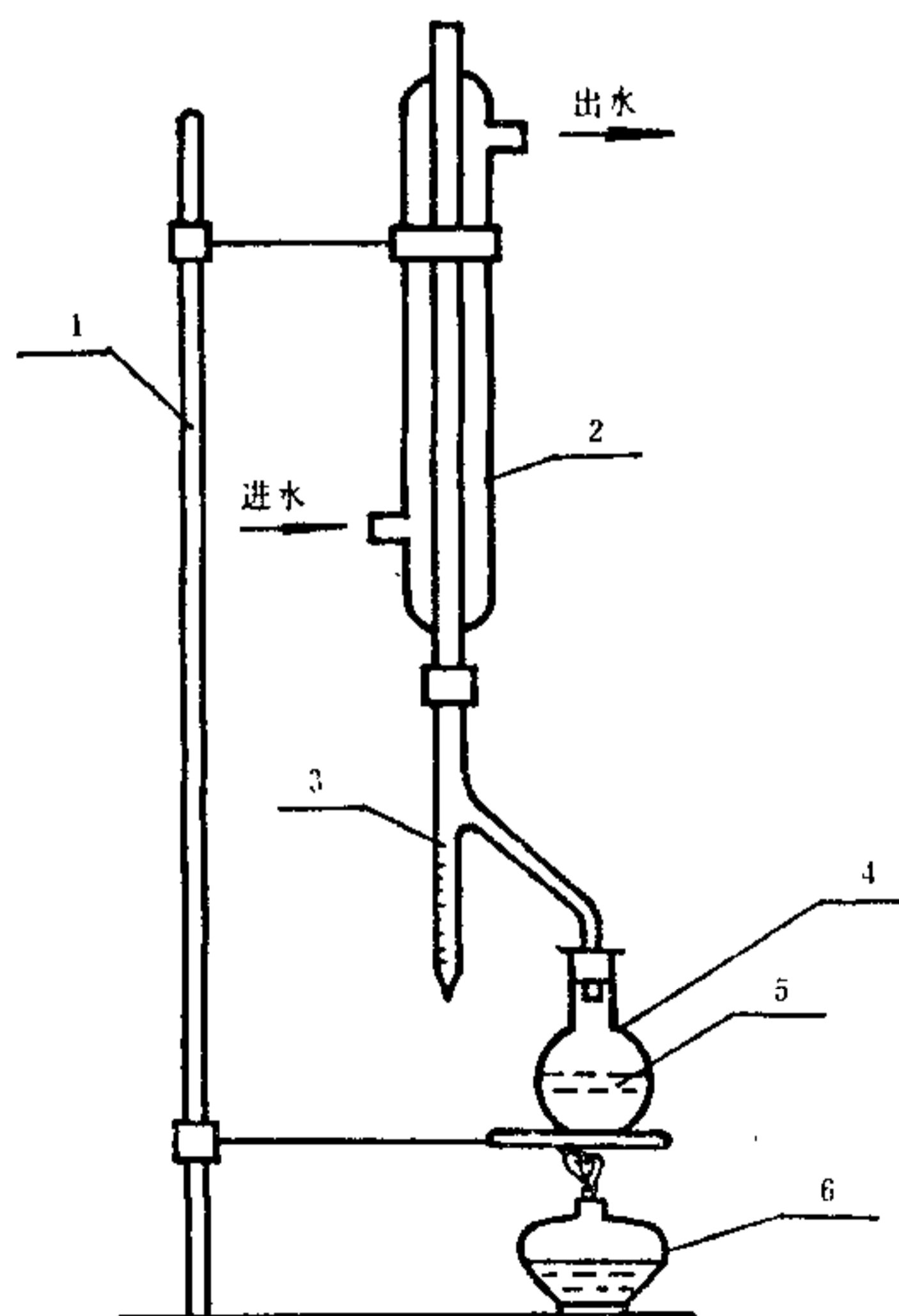


图 I2 水分测定仪的使用示意图

1—支架；2—冷凝管，使用时通水；3—承接管；4—烧瓶；  
5—样品、脱脂棉和甲苯溶液；6—酒精灯

13.6 将烧瓶内的无水甲苯液和脱脂棉等全部倒在滤纸上过滤,并用丙酮溶液冲洗烧瓶,冲洗后溶液也倒在滤纸上,然后用丙酮再冲洗滤纸上的滤上物,焦油溶解于丙酮液中被滤去,滤纸上最后只有脱脂棉和灰分,将滤纸和滤上物烘干后称重,称出质量减去滤纸和脱脂棉重,就得到灰分的质量  $m_{hf}$ 。

13.7 样品中焦油的质量  $m_{iy}$  ·g

$$m_{iy} = m_{yp} - m_{st} - m_{hf} \quad \dots\dots\dots (I2)$$

14 计算公式

14.1 煤气中焦油含量  $m_j$ , kg/m<sup>3</sup>

$$m_j = \frac{1\ 000 \times m_{iy}}{\frac{22.4}{18} \times m_{st} + V_m \times \frac{P + P_j}{101\ 325} \times \frac{273}{273 + t_m}} \quad \dots\dots\dots (I3)$$

式中:  $m_{iy}$  ——样品中焦油重, g;  
 $m_{st}$  ——样品中水分重, g;  
 $P$  ——大气压, Pa;  
 $P_j$  ——流经流量计时煤气静压, Pa;  
 $V_m$  ——流经流量计的煤气流量, L;  
 $t_m$  ——流经流量计时煤气的温度, °C。

14.2 煤气中水分的体积百分含量  $W_m$ , %

$$W_m = \frac{\frac{22.4}{18} \times m_{st} + V_m \times \frac{P_b}{101\ 325} \times \frac{273}{273 + t_m}}{\frac{22.4}{18} \times m_{st} + V_m \times \frac{P + P_j}{101\ 325} \times \frac{273}{273 + t_m}} \times 100 \quad \dots\dots\dots (I4)$$

式中:  $P_b$  ——饱和水蒸汽分压, Pa 根据温度查饱和蒸汽表。

15 注意事项

- 15.1 采样管弯头必须与气流方向平行,开口对着气流方向。
- 15.2 取样时要等速取样,使采样管口的煤气流速和管道内煤气流速相等,则煤气取样量:

$$V'_m = \frac{\pi}{4} D^2 \times W_{om} \times 60 \times 1\ 000 \times \frac{101\ 325}{P + P_j} \times \frac{273 + t_m}{273} \quad \dots\dots\dots (I5)$$

式中:  $V'_m$  ——每分钟从管道内抽取的煤气量;  
 $D$  ——取样管口直径, m;  
 $W_{om}$  ——管道内煤气在标态下的流速, m/s。

- 15.3 取样时为减少分析误差,所取样品量应多一些。
- 15.4 脱脂棉和滤纸使用前要分别烘干后称重,脱脂棉应保持干燥。
- 15.5 U型管应擦干净后称重,不要烘干。
- 15.6 测定水分时,蒸馏速度不宜快,应控制在每分钟2~4滴,以保证蒸发出来的水分都被冷凝下来。
- 15.7 如蒸发出的水分多,承接管中装不下,可分二次进行。
- 15.8 甲苯蒸汽对人体有害,且有火灾危险,蒸馏时应放在通风橱内进行。
- 15.9 其他注意事项可参照附录 H 中 H5。

**附录 J**  
**测定气体流量时测点的选择与计算方法**  
(参考件)

**J1 测定位置的选择**

气体流量在管道上的测定位置,即测定截面应尽量避免弯曲、变形和有闸板的部位,避免涡流和漏风的影响。测定截面的上游最好具有大于5倍于管道直径的直段长,下游最好具有大于3倍于管道直径的直段长。但测定现场往往满足不了这些要求,只能尽可能选择较适宜的部位作为测定截面。

**J2 测定方法**

**J2.1 圆形管道**

采用对数—线性法求平均流速的测点位置(测点在相距90°的四个半径上取),取法见表 J1。

表 J1 圆形管道测点位置

每个半径的测点数	测点离管壁的距离 $y/D$			
3	0.032	0.135	0.321	
5	0.019	0.077	0.153	0.217 0.361

**J2.2 矩形管道**

矩形管道中流量的测量方法可采用等面积小矩形法,即把矩形截面划分为若干个等面积的小矩形,在每一个小矩形对角线的交点上测流速取平均值。划分方法如图 J1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)一般不应小于表 J2中所列的数值。

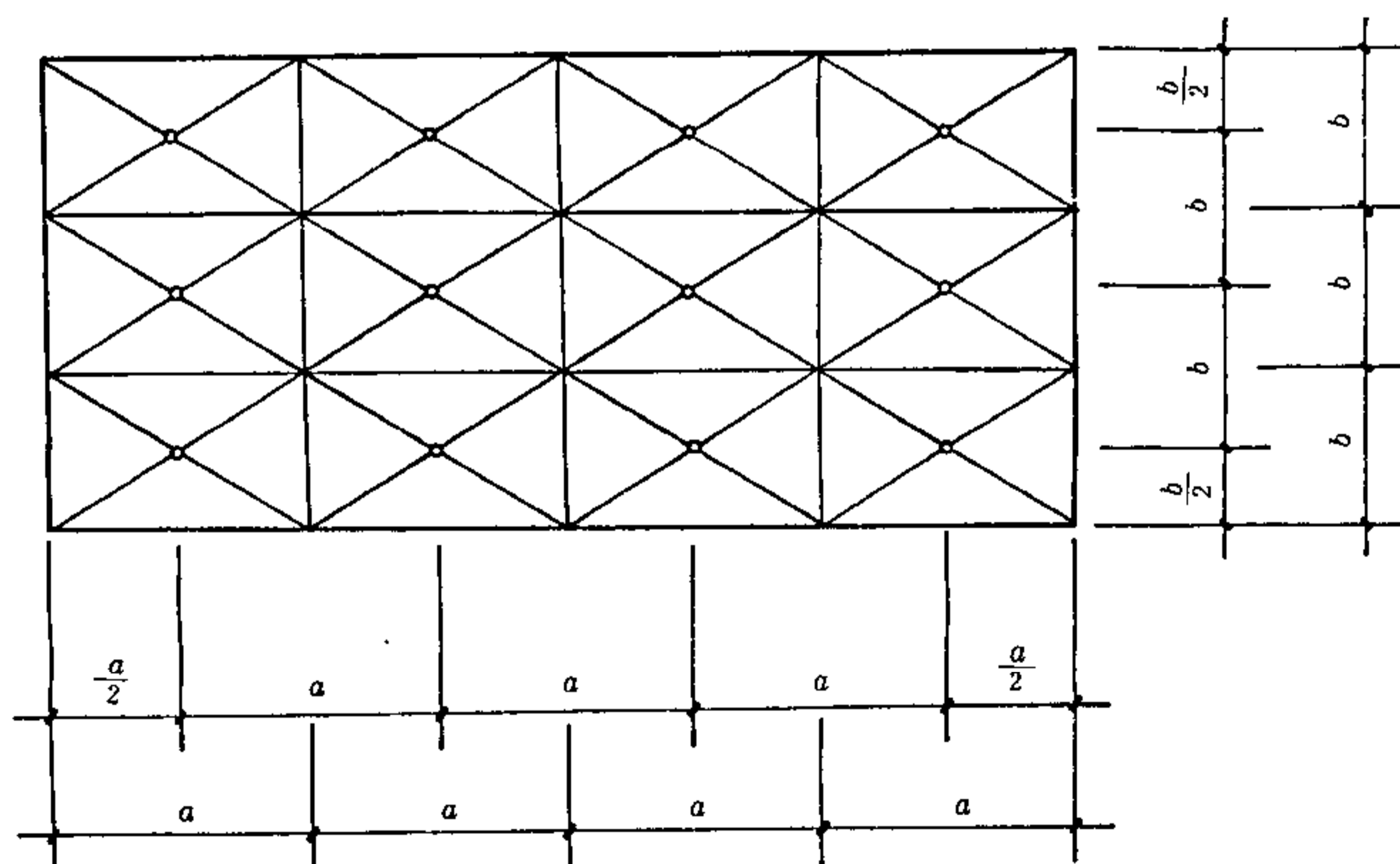


图 J1 矩形截面测点分布图

表 J2 矩形管道测点数的选择

矩形管道截面边长 mm	<500	>500~1 000	>1 000~1 500	>1 500~2 000	>2 000~2 500	>2 500
测点排数	3	4	5	6	7	8

**J3 计算方法**

**J3.1 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  $w_1, w_2, \dots, w_n$ , 然后求得该截面流体的平均流速  $w$ , m/s。

$$w = K_d \times \sqrt{\frac{2}{\rho_t}} \times \frac{\sum_{i=1}^n \sqrt{\Delta P_i}}{n} \dots\dots\dots (J1)$$

式中:  $n$  —— 测点数;

$K_d$  —— 毕托管校正系数;

$\Delta P_i$  —— 各测点的动压值, Pa;

$\rho_t$  —— 工作状态下气体的密度, kg/m<sup>3</sup>, 按(J2)式计算。

$$\rho_t = \rho_o \frac{273}{273 + t} \dots\dots\dots (J2)$$

式中:  $t$  —— 管道内气体温度, °C;

$\rho_o$  —— 标准状态下气体的密度, kg/m<sup>3</sup>, 按(J3)式计算。

$$\rho_o = 0.01 \sum X_i \rho_{oi} \dots\dots\dots (J3)$$

式中:  $X_i$  —— 气体中各种成分的百分含量;

$\rho_{oi}$  —— 各种气体成分在标准状态下的密度, kg/m<sup>3</sup>, 见附录 G 表 G1。

**J3.2 气体的平均流量**

$$V_o = 3\,600 F w \frac{P + P_j}{101\,325} \frac{273}{273 + t} \dots\dots\dots (J4)$$

式中:  $V_o$  —— 标准状态下气体的平均流量, m<sup>3</sup>/h;

$F$  —— 管道截面积, m<sup>2</sup>;

$P$  —— 大气压, Pa;

$P_j$  —— 管道内气体静压, Pa。

**附加说明:**

本标准由国家建筑材料工业局蚌埠玻璃工业设计研究院技术归口。

本标准由国家建材局蚌埠玻璃工业设计研究院秦皇岛热能监测所负责起草。

本标准主要起草人薛稚颖、吴玉桥、王宗伟、朱新楼。

(京)新登字 023 号

JC 488—92

中华人民共和国建材  
行业 标准  
玻璃池窑热平衡测定与计算方法  
JC 488—92

\*

中国标准出版社出版  
(北京复外三里河)  
中国标准出版社北京印刷厂印刷  
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售  
版权专有 不得翻印

\*

开本 880×1230 1/16 印张 3 字数 87 000  
1992 年 12 月第一版 1992 年 12 月第一次印刷  
印数 1—3 000

\*

\*

标 目 204—42