

# 中华人民共和国国家标准

GB/T 25039—2010

---

## 玻璃纤维单元窑热平衡测定与计算方法

Determination and calculation of heat balance for fibreglass unit melter

2010-09-02 发布

2011-05-01 实施

---

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局  
中国国家标准化管理委员会 发布

## 目 次

前言 .....	I
1 范围 .....	1
2 规范性引用文件 .....	1
3 符号与单位 .....	1
4 基准 .....	1
5 体系 .....	1
6 热平衡框图 .....	2
7 测试准备、要求、记录、项目和方法 .....	2
8 物料平衡计算 .....	3
8.1 熔窑物料平衡计算 .....	3
8.2 通路物料平衡计算 .....	8
9 热平衡计算 .....	9
9.1 熔窑热平衡计算 .....	9
9.2 通路热平衡计算 .....	16
10 热效率计算 .....	19
附录 A (规范性附录) 符号与单位 .....	21
附录 B (规范性附录) 单元窑基本情况及热平衡参数测定结果记录表 .....	28
附录 C (规范性附录) 燃料低位发热量的计算 .....	34
附录 D (规范性附录) 测定气体流量时测点的选择与计算方法 .....	35
附录 E (规范性附录) 烟气中水分含量测定方法 .....	37
附录 F (规范性附录) 各类数据表 .....	39
附录 G (规范性附录) 理论空气量、烟气量及空气系数计算 .....	42
附录 H (规范性附录) 每千克粉料(湿基)逸出气体产物量和形成氧化物量计算 .....	43
附录 I (规范性附录) 玻璃液理论澄清温度和平均比热容计算方法 .....	44
参考文献 .....	46

## 前 言

本标准的附录 A、附录 B、附录 C、附录 D、附录 E、附录 F、附录 G、附录 H 和附录 I 为规范性附录。

本标准由中国建筑材料联合会提出。

本标准由全国玻璃纤维标准化技术委员会(SAC/TC 245)归口。

本标准负责起草单位:南京玻璃纤维研究设计院、中材科技股份有限公司。

本标准参加起草单位:巨石集团有限公司。

本标准主要起草人:徐闻天、葛敦世、王玉梅、董鹤崙。

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

# 玻璃纤维单元窑热平衡测定与计算方法

## 1 范围

本标准规定了玻璃纤维单元窑热平衡、热效率测定与计算的符号与单位、基准、体系、热平衡框图、记录、测试项目和方法、物料平衡计算、热平衡计算及热效率计算方法。

本标准适用于以液体燃料、气体燃料和以电能为热源的玻璃纤维单元窑。

## 2 规范性引用文件

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

GB/T 384 石油产品热值测定法

GB/T 1884 原油和液体石油产品密度实验室测定法（密度计法）

GB/T 2624.2 用安装在圆形截面管道中的差压装置测量满管流体流量 第2部分：孔板

GB/T 8222 用电设备电能平衡通则

SYL04 天然气流量的标准孔板计量方法

## 3 符号与单位

本标准采用的符号与单位见附录 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℃, 101 325 Pa)下的体积量为基准。
- 4.4 质量以千克为基准。
- 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：
  - 按体积分数：氧(O<sub>2</sub>)21.0%，氮(N<sub>2</sub>)79.0%。
  - 按质量分数：氧(O<sub>2</sub>)23.2%，氮(N<sub>2</sub>)76.8%。

## 5 体系

- 5.1 包括二个独立的系统：1)熔窑系统；2)通路系统。在热平衡计算时，对这二个系统分别进行计算。
- 5.2 熔窑系统包括熔化部、流液洞、水平烟道、垂直烟道、金属换热器、热风管道。熔窑系统的分界面是：窑体的外表面、配合料进投料口及玻璃液离开流液洞的界面、助燃空气进金属换热器以及燃料等物料进入熔化部，放空空气离开换热器放空管，烟气离开换热器的界面。对纯氧助燃的熔窑系统则不包括金属换热器，助燃氧气经氧枪直接进入熔化部，烟气离开熔窑的垂直烟道的界面作为熔窑系统的分界面。其他界面同空气助燃的熔窑系统。
- 5.3 通路系统包括主通路、过渡通路和成型通路以及各排烟烟囱。通路系统的分界面是：玻璃液离开流液洞进入主通路的界面，玻璃液离开各漏板的流液槽的界面，燃料及助燃气体进入通路，烟气离开各排烟烟囱的界面。

6 热平衡框图

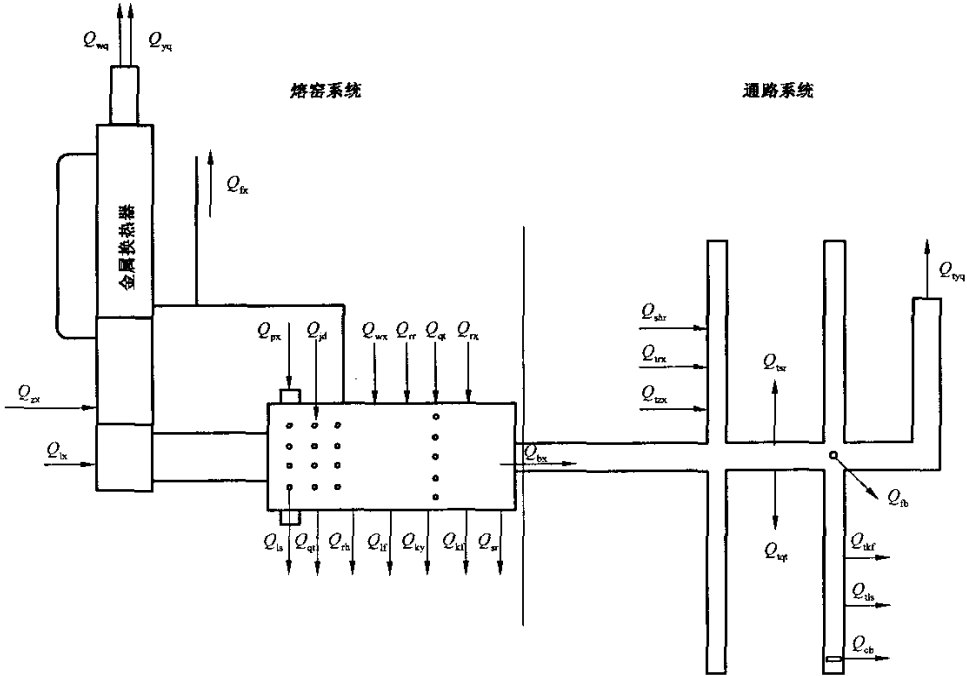


图 1 单元窑热平衡体系示意图  
(以空气助燃为例)

7 测试准备、要求、记录、项目和方法

7.1 测试准备

- 7.1.1 根据具体情况制订测定方案,确定测试项目、参数,选择合适的测量位置、测量仪表和测量装置。
- 7.1.2 测量仪表应经检定合格。
- 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 测试要求

- 7.2.1 测试应在正常稳定生产的状况下进行,如遇生产状况不稳应停止测试,待恢复到稳定状态后再进行。停止测试期间的各种物料量(如玻璃液产量、燃料消耗量),不包括在统计数据内。
- 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 测试周期应尽量缩短。

7.3 测试记录

- 7.3.1 单元窑基本情况记录表按附录 B 表 B.1。
- 7.3.2 单元窑主要技术经济指标记录表按附录 B 表 B.2。
- 7.3.3 各项参数测试记录表按附录 B 表 B.3、表 B.4、表 B.5、表 B.6 和表 B.7。

7.4 测试项目、参数和方法

按表 1 的规定。

## 8 物料平衡计算

## 8.1 熔窑物料平衡计算

## 8.1.1 进熔窑体系物料质量计算

表 1 测试项目、参数和方法

项目	参数	方法
燃料	成分	重油成分(C、H、O、N、S、A、W)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,密度的测定方法按 GB/T 1884 进行。 气体燃料成分(CO、H <sub>2</sub> 、CH <sub>4</sub> 、C <sub>x</sub> H <sub>m</sub> 、O <sub>2</sub> 、CO <sub>2</sub> )在进窑端取样后用奥氏气体分析仪测定,取三次测定平均值
	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 C 计算
	温度	在进入体系的入口处用温度计测定
	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,也可用质量流量计直接测得质量流量。 天然气、焦炉煤气的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/T 2624.2 或 SYL04
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 D,也可采用有温度和压力补偿的孔板流量计,计量方法按 GB/T 2624.2 或 SYL04
换热器放空空气	温度	用温度计在助燃空气出体系的界面处测量
	流量	采用有温度和压力补偿的孔板流量计,计量方法按 GB/T 2624.2 或 SYL04
工业摄像机镜头用压缩空气	温度	用温度计在压缩空气入体系处测量
	流量	采用转子流量计测量。无法测量时可取摄像机的设计值
助燃氧气	温度	用温度计在助燃氧气入体系的界面处测量
	流量	用有温度和压力补偿的孔板流量计,计量方法按 GB 2624.2 或 SYL04
	成分	由氧气站提供
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,取五点平均值
	流量	在总风管上用毕托管或热球风速仪测量,方法按附录 D
配合料	温度	用温度计在投料机料斗的取样孔内测量料层温度
	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	投料机料斗的取样孔取样分析
	废丝玻璃量	根据废丝玻璃量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
	产量	根据实测玻璃液出料量或投料量计算

表 1 (续)

项 目	参 数	方 法	
烟 气	温 度	对空气助燃单元窑,在出金属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。 对全氧助燃单元窑,在烟道后出体系的界面处,分不同部位,测三点温度,求平均值	
	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 D,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 E 方法测定	
供 给 电 能	电 功 率	用单相(或三相)标准电度表,瓦特表或相同精度的电平衡测定仪连续测量一个小时,每个进体系处,每对电极或发热元件的电功率,按 GB/T 8222 进行测定	
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	根据经核实的设计图纸计算	
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,无法测量时取设计值
	压 缩 氧 气	温 度	用温度计测量
		流 量	用氧气流量计测量
		成 分	由氧气站提供
鼓 泡 空 气	流 量	用在线的转子流量计测量	
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	

8.1.1.1 燃料质量  $m_r$  (kg/h)

8.1.1.1.1 当使用重油作燃料时:

$$m_r = \frac{V_r \times \rho_t}{24} \dots\dots\dots (1)$$

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

式中:

- $V_t$ ——测定期间平均日耗油量,单位为立方米每天( $\text{m}^3/\text{d}$ );
- $\rho_t$ ——重油流经流量计时的密度,单位为千克每立方米( $\text{kg}/\text{m}^3$ ),实测或按式(2)计算;
- $\rho_{20}$ ——20℃时重油的密度,单位为千克每立方米( $\text{kg}/\text{m}^3$ ),由实测得;
- $\beta$ ——体积膨胀系数, $\beta = 0.0025 - 0.002 \times \rho_{20} \times 10^{-3}$ ;
- $t_t$ ——重油流经流量计时的温度,单位为摄氏度(℃)。

8.1.1.1.2 当使用气体燃料时:

$$m_t = V_{or} \times \rho_0 \dots\dots\dots (3)$$

式中:

- $V_{or}$ ——气体燃料量,单位为立方米每小时( $\text{m}^3/\text{h}$ );
- $\rho_0$ ——标准状态下燃气密度,单位为千克每立方米( $\text{kg}/\text{m}^3$ ),按式(4)计算。

$$\rho_0 = 0.01 \sum (X_i \rho_{oi}) \dots\dots\dots (4)$$

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,单位为千克每立方米( $\text{kg}/\text{m}^3$ ),见附录 F 表 F.1。

8.1.1.2 助燃介质质量  $m_x$  ( $\text{kg}/\text{h}$ )

8.1.1.2.1 当用空气助燃时:

$$m_x = 1.293 \times V_{if} \dots\dots\dots (5)$$

式中:

- $V_{if}$ ——进换热器助燃冷风量,单位为立方米每小时( $\text{m}^3/\text{h}$ )。

8.1.1.2.2 当用氧气助燃时:

$$m_x = V_{oyn} \times \rho_{oyn} \dots\dots\dots (6)$$

式中:

- $V_{oyn}$ ——进体系助燃氧气量,单位为立方米每小时( $\text{m}^3/\text{h}$ );
- $\rho_{oyn}$ ——标准状态下氧气的密度,单位为千克每立方米( $\text{kg}/\text{m}^3$ ),比照式(4)计算。

8.1.1.3 配合料质量  $m_p$  ( $\text{kg}/\text{h}$ )

$$m_p = \frac{n_p \times m_t \times (1 + m_{is})}{24} \dots\dots\dots (7)$$

式中:

- $n_p$ ——测定期间平均日投料付数;
- $m_t$ ——每付粉料(湿基)的质量,单位为千克(kg);
- $m_{is}$ ——每千克粉料(湿基)配成配合料时添加的废丝玻璃量,单位为千克每千克( $\text{kg}/\text{kg}$ )。

8.1.1.4 鼓泡空气质量  $m_g$  ( $\text{kg}/\text{h}$ )

$$m_g = 0.07758 \sum_{i=1}^n V_{gi} \dots\dots\dots (8)$$

式中:

- $V_{gi}$ ——窑内第  $i$  根鼓泡管鼓泡空气体积流量,  $\text{L}/\text{min}$ ,由在线鼓泡控制盘测量。

8.1.1.5 雾化介质质量  $m_w$  ( $\text{kg}/\text{h}$ )

8.1.1.5.1 当使用压缩空气作雾化介质时:

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

式中:

- $V_{wk}$ ——雾化用压缩空气流量,单位为立方米每小时( $\text{m}^3/\text{h}$ )。



8.1.1.5.2 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。

8.1.1.5.3 当用氧气作雾化介质时:

$$m_w = V_{wya} \times \rho_{O_2} \quad \dots\dots\dots (10)$$

式中:

$V_{wya}$ ——雾化用氧气流量, 单位为立方米每小时( $m^3/h$ );

$\rho_{O_2}$ ——标准状态下氧气的密度, 单位为千克每立方米( $kg/m^3$ ), 比照式(4)计算。

8.1.1.6 漏入空气质量  $m_l$  ( $kg/h$ )

8.1.1.6.1 当使用重油作燃料时:

$$m_l = 1.293 \times (\alpha_c - \alpha_k) \times V_k^0 \times m_r \quad \dots\dots\dots (11)$$

式中:

$\alpha_c$ ——烟气出体系时的过剩空气系数。计算见附录 G;

$\alpha_k$ ——烟气离开熔化部时过剩空气系数;

$V_k^0$ ——理论空气量, 单位为立方米每千克( $m^3/kg$ ), 计算见附录 G;

$m_r$ ——进体系燃料质量, 单位为千克每小时( $kg/h$ )。

8.1.1.6.2 当使用气体燃料时:

$$m_l = 1.293 \times (\alpha_c - \alpha_k) \times V_k^0 \times V_{or} \quad \dots\dots\dots (12)$$

式中:

$V_{or}$ ——进体系气体燃料量, 单位为立方米每小时( $m^3/h$ )。

注: 对于全氧助燃的单元窑, 漏入空气量不能忽略时, 可根据氧、氮气的比例进行计算。

8.1.1.7 工业摄像机镜头用压缩空气质量  $m_a$  ( $kg/h$ )

$$m_a = 0.07758V_s \quad \dots\dots\dots (13)$$

式中:

$V_s$ ——工业摄像机镜头用压缩空气体积流量, 单位为升每分钟( $L/min$ )。

8.1.1.8 进体系物料总质量  $m_{zs}$  ( $kg/h$ )

$$m_{zs} = m_r + m_{sr} + m_p + m_g + m_w + m_l \quad \dots\dots\dots (14)$$

8.1.2 出熔容体系物料质量计算

8.1.2.1 烟气质量  $m_y$  ( $kg/h$ )

$$m_y = V_{oy} \times \rho_0 \quad \dots\dots\dots (15)$$

$$V_{oy} = 3600 \times S_d \times K_d \times \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sqrt{\Delta P_i} \times \sqrt{\frac{2 \times (P + P_j) \times 273}{\rho_0 \times 101325 \times (273 + t_q)}} \quad \dots\dots\dots (16)$$

式中:

$V_{oy}$ ——出体系时烟气流量, 单位为立方米每小时( $m^3/h$ );

$\rho_0$ ——标准状态下气体的密度, 单位为千克每立方米( $kg/m^3$ ), 按式(4)计算;

$S_d$ ——测流量断面的截面积, 单位为平方米( $m^2$ );

$K_d$ ——毕托管校正系数;

$n$ ——测流量断面内的测点数;

$\Delta P_i$ ——测流量断面内第  $i$  点的动压值, 单位为帕斯卡(Pa);

$P$ ——大气压, 单位为帕斯卡(Pa);

$P_j$ ——测流量断面内的静压, 单位为帕斯卡(Pa);

$t_q$ ——测流量断面内的气体平均温度, 单位为摄氏度( $^{\circ}C$ )。

8.1.2.2 玻璃液质量  $m_b$  ( $kg/h$ )

8.1.2.2.1 按出料量计算时:

$$m_b = \sum_{i=1}^n \left( \frac{m_{si}}{\tau_{mi}} \times 60 \right) + m_{fb} \quad \dots\dots\dots (17)$$

式中:

$n$ ——漏板数量;

$m_{si}$ ——第  $i$  块漏板满筒玻璃纤维原丝(扣除水分和浸润剂)质量,单位为千克(kg);

$\tau_{mi}$ ——第  $i$  块漏板满筒原丝的拉丝时间,单位为分钟(min);

$m_{fb}$ ——由通路放料孔排放出的玻璃液总流量,单位为千克每小时(kg/h)。

#### 8.1.2.2.2 按投料量计算时:

$$m_b = \frac{m_p}{m_{bf} + m_{bs}} \quad \dots\dots\dots (18)$$

$$m_{bf} = \frac{1}{1 - m_{iq} + m_{is}} \quad \dots\dots\dots (19)$$

$$m_{bs} = m_{bf} \times m_{is} \quad \dots\dots\dots (20)$$

式中:

$m_p$ ——配合料投料量,单位为千克每小时(kg/h);

$m_{bf}$ ——熔成每千克玻璃液所需粉料(湿基)量,单位为千克每千克(kg/kg),按式(19)计算;

$m_{bs}$ ——熔成每千克玻璃液所需废丝量,单位为千克每千克(kg/kg),按式(20)计算;

$m_{iq}$ ——每千克粉料(湿基)中逸出气体的质量,单位为千克每千克(kg/kg);

$m_{is}$ ——每千克粉料(湿基)配成配合料时添加的碎玻璃量,单位为千克每千克(kg/kg)。

#### 8.1.2.3 换热器放空空气质量 $m_{fk}$ (kg/h)

$$m_{fk} = 1.293 \times V_{fk} \quad \dots\dots\dots (21)$$

式中:

$V_{fk}$ ——换热器放空空气量,单位为立方米每小时(m<sup>3</sup>/h)。

#### 8.1.2.4 溢流气体质量 $m_{ky}$ (kg/h)

$$m_{ky} = \sum_{i=1}^n V_{ki} \rho_0 \quad \dots\dots\dots (22)$$

式中:

$V_{ki}$ ——窑体第  $i$  个孔口的溢流气体量,单位为立方米每小时(m<sup>3</sup>/h),按式(23)计算。

$$V_{ki} = \pm 3\,600 \times S_{ki} \times \mu_i \times \sqrt{\frac{2 \times |\Delta P_{ki}| \times (P + \Delta P_{ki}) \times 273}{\rho_0 \times 101\,325 \times (t_{ki} + 273)}} \quad \dots\dots\dots (23)$$

式中:

$S_{ki}$ ——窑体第  $i$  个孔口的面积,单位为平方米(m<sup>2</sup>);

$\mu_i$ ——窑体第  $i$  个孔口的溢流系数:

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

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

$\delta$ ——溢流孔口处窑墙厚度,单位为米(m);

$d_e$ ——溢流孔口当量直径,单位为米(m);

$\Delta P_{ki}$ ——孔口内外静压差,单位为帕斯卡(Pa),当  $\Delta P_{ki}$  为正值时,  $V_{ki}$  取正值,当  $\Delta P_{ki}$  为负值时,  $V_{ki}$  取负值;

$P$ ——大气压,单位为帕斯卡(Pa);

$\rho_0$ ——标准状态下气体的密度,单位为千克每立方米(kg/m<sup>3</sup>),按式(4)计算;

$t_{ki}$ ——窑体第  $i$  个孔口溢流气体温度,单位为摄氏度(°C)。

#### 8.1.2.5 出体系其他物料质量 $m_{qt}$ (kg/h)

$$m_{qt} = m_s - (m_y + m_b + m_{fk} + m_{ky}) \quad \dots\dots\dots (24)$$

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。

8.1.2.6 出体系物料总质量  $m_x$  (kg/h)

$$m_x = m_y + m_b + m_{ik} + m_{ky} + m_{qt} \dots\dots\dots (25)$$

8.1.3 熔窑物料平衡表

熔窑物料平衡表见表 2。

表 2 熔窑物料平衡表

进熔窑物料质量				出熔窑物料质量			
序号	项 目	数值 kg/h	百分数 %	序号	项 目	数值 kg/h	百分数 %
1	燃料质量 $m_r$			1	烟气质量 $m_y$		
2	进熔窑助燃介质质量 $m_{tr}$			2	玻璃液质量 $m_b$		
3	配合料质量 $m_p$			3	换热器放空空气质量 $m_{ik}$		
4	雾化介质质量 $m_w$			4	溢流气体质量 $m_{ky}$		
5	漏入空气质量 $m_l$			5	其他出体系物料质量 $m_{qt}$		
6	鼓泡空气质量 $m_k$						
合计	进体系物料总质量 $m_{za}$			合计	出体系物料总质量 $m_x$		

8.2 通路物料平衡计算

8.2.1 进通路物料

8.2.1.1 通路燃气质量  $m_{tr}$  (kg/h)

$$m_{tr} = V_{tr} \times \rho_0 \dots\dots\dots (26)$$

式中：

$V_{tr}$ ——进入通路燃气流量，单位为立方米每小时( $m^3/h$ )；

$\rho_0$ ——标准状态下燃气的密度，单位为千克每立方米( $kg/m^3$ )，比照式(4)计算。

8.2.1.2 通路助燃介质质量  $m_{tr}$  (kg/h)

8.2.1.2.1 当用空气助燃时

$$m_{tr} = 1.293 \times V_{ik} \dots\dots\dots (27)$$

式中：

$V_{ik}$ ——进通路助燃空气流量，单位为立方米每小时( $m^3/h$ )。

8.2.1.2.2 当用氧气助燃时

$$m_{tr} = V_{tya} \times \rho_{oya} \dots\dots\dots (28)$$

式中：

$V_{tya}$ ——进体系助燃氧气量，单位为立方米每小时( $m^3/h$ )；

$\rho_{oya}$ ——标准状态下氧气的密度，单位为千克每立方米( $kg/m^3$ )，比照式(4)计算。

8.2.1.3 进入通路的玻璃液量  $m_b$  (kg/h)

同 8.1.2.2。

8.2.1.4 进通路物料总质量  $m_{za}$  (kg/h)

$$m_{za} = m_{tr} + m_{tr} + m_b \dots\dots\dots (29)$$

8.2.2 出通路物料

8.2.2.1 出通路烟气质量  $m_y$  (kg/h)

$$m_y = \sum_{i=1}^n (V_{tyi} \times \rho_{tyi}) \dots\dots\dots (30)$$

式中:

$V_{ty}$ ——出通路第  $i$  个烟道的烟气流量,单位为立方米每小时( $m^3/h$ ),计算方法见附录 D;

$\rho_{tyi}$ ——通路第  $i$  个烟道的烟气的密度,单位为千克每立方米( $kg/m^3$ ),比照式(4)计算。

8.2.2.2 通路放料漏板放出的玻璃液量  $m_n$  (kg/h)

8.2.2.3 通路成型玻璃液质量  $m_{cb}$  (kg/h)

$$m_{cb} = m_b - m_n \quad \dots\dots\dots (31)$$

8.2.2.4 出通路其他物料质量  $m_{tq}$  (kg/h)

$$m_{tq} = m_{uc} - (m_{ty} + m_{fb} + m_{cb}) \quad \dots\dots\dots (32)$$

注:其他出通路物料质量的绝对值占进体系物料总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。

8.2.2.5 出通路物料总质量  $m_{uc}$  (kg/h)

$$m_{uc} = m_{ty} + m_{fb} + m_{cb} + m_{tq} \quad \dots\dots\dots (33)$$

8.2.3 通路物料平衡表

通路物料平衡表见表 3。

9 热平衡计算

9.1 熔窑热平衡计算

9.1.1 熔成每千克玻璃液理论耗热量计算

表 3 通路物料平衡表

进通路物料质量 kg/h				出通路物料质量 kg/h			
序号	项 目	数值 kg	百分数 %	序号	项 目	数值 kg	百分数 %
1	燃料质量 $m_{ur}$			1	通路烟气产出量 $m_{ty}$		
2	助燃介质质量 $m_{ur}$			2	放料漏板放出玻璃液量 $m_n$		
3	进入通路玻璃液量 $m_b$			3	成型玻璃液量 $m_{cb}$		
				4	其他出通路物料质量 $m_{tq}$		
合计	进通路物料总质量 $m_{uc}$			合计	出通路物料总质量 $m_{uc}$		

9.1.1.1 硅酸盐形成反应耗热  $Q_1$  (kJ/kg)

$$Q_1 = m_{bf} \sum_{i=1}^n q_i m_{bi} \quad \dots\dots\dots (34)$$

式中:

$m_{bf}$ ——熔成每千克玻璃液所需粉料(湿基)量,单位为千克每千克(kg/kg);

$q_i$ ——各种原料硅酸盐形成反应热(以千克分解氧化物计),单位为千焦尔每千克(kJ/kg),查附录 F 表 F.4;

$m_{bi}$ ——每千克粉料(湿基)中,各种原料引入的分解氧化物质量,单位为千克每千克(kg/kg),见附录 H 表 H.2。

9.1.1.2 形成玻璃液耗热  $Q_2$  (kJ/kg)

$$Q_2 = 347 \times m_{bf} \times (1 - m_{tq}) \quad \dots\dots\dots (35)$$

式中:

$m_{bf}$ ——熔成每千克玻璃液所需粉料(湿基)量,单位为千克每千克(kg/kg);

$m_{tq}$ ——每千克粉料(湿基)中逸出气体的质量,单位为千克每千克(kg/kg)。

9.1.1.3 加热玻璃液到理论澄清温度耗热  $Q_3$  (kJ/kg)

$$Q_3 = c_{bl} \times t_{bl} \quad \dots\dots\dots (36)$$

式中:

$c_{bl}$ ——玻璃液在  $0\text{ }^{\circ}\text{C} \sim t_{bl}\text{ }^{\circ}\text{C}$  时的平均比热容,单位为千焦耳每千克每度  $[\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$ ,计算方法见附录 I;

$t_{bl}$ ——玻璃液在黏度为  $10\text{ Pa} \cdot \text{s}$  时的温度值,即为玻璃液理论澄清温度,单位为摄氏度( $^{\circ}\text{C}$ ),计算方法见附录 I。

9.1.1.4 蒸发有效水分耗热  $Q_4$  (kJ/kg)

$$Q_4 = 2\,491 \times m_{bf} \times m_{H_2O} \dots\dots\dots (37)$$

式中:

$m_{bf}$ ——熔成每千克玻璃液所需粉料(湿基)量,单位为千克每千克(kg/kg);

$m_{H_2O}$ ——每千克粉料中含有有效水质量,单位为千克每千克(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%。

9.1.1.5 加热配合料中逸出气体各组分到玻璃液理论澄清温度耗热  $Q_5$  (kJ/kg)

$$Q_5 = m_{bf} \times V_{fq} \times c_{fq} \times t_{bl} \dots\dots\dots (38)$$

式中:

$m_{bf}$ ——熔成每千克玻璃液所需粉料(湿基),单位为千克每千克(kg/kg);

$V_{fq}$ ——每千克粉料中逸出气体的体积,单位为立方米每千克( $\text{m}^3/\text{kg}$ ),计算方法见附录 H 表 H.1;

$c_{fq}$ ——在  $0\text{ }^{\circ}\text{C} \sim t_{bl}\text{ }^{\circ}\text{C}$  时逸出气体的平均比热容,单位为千焦耳每立方米每度  $[\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})]$ ,按式(39)计算;

$$c_{fq} = 0.01(\sum X_i c_{pi}) \dots\dots\dots (39)$$

式中:

$X_i$ ——气体中各组分的体积百分含量(%);

$c_{pi}$ ——气体中第  $i$  组分的平均定压比热容,单位为千焦耳每立方米每度  $[\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})]$ ,见附录 F 表 F.2、表 F.3;

$t_{bl}$ ——玻璃液理论澄清温度。

9.1.1.6 配合料入窑显热  $Q_6$  (kJ/kg)

$$Q_6 = m_{bf} \times c_n \times t_n + m_{bs} \times c_s \times t_s \dots\dots\dots (40)$$

式中:

$m_{bf}$ ——熔成每千克玻璃液所需粉料(湿基)量,单位为千克每千克(kg/kg);

$c_n$ ——粉料在  $0\text{ }^{\circ}\text{C} \sim t_n\text{ }^{\circ}\text{C}$  时的平均比热容,单位为千焦耳每千克每度  $[\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$ ,一般取  $c_{fi} = 0.963\text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ;

$t_n$ ——粉料入窑温度,单位为摄氏度( $^{\circ}\text{C}$ );

$m_{bs}$ ——熔制每千克玻璃液所需废丝玻璃量,单位为千克每千克(kg/kg);

$c_s$ ——废丝玻璃在  $0\text{ }^{\circ}\text{C} \sim t_s\text{ }^{\circ}\text{C}$  时的平均比热容,单位为千焦耳每千克每度  $[\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$ ,计算方法见附录 I;

$t_s$ ——废丝玻璃入窑温度,单位为摄氏度( $^{\circ}\text{C}$ )。

9.1.1.7 熔成每千克玻璃液理论耗热量  $Q_b$  (kJ/kg)

$$Q_b = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 - Q_6 \dots\dots\dots (41)$$

注:熔成每千克玻璃液理论耗热量  $Q_b$ ,本标准规定:普通无碱玻璃为  $3\,135\text{ kJ}/\text{kg}$ ,中碱玻璃为  $2\,926\text{ kJ}/\text{kg}$ 。

9.1.2 熔窑有效热  $Q_{yx}$  (kJ/h)

$$Q_{yx} = m_b \times Q_b \dots\dots\dots (42)$$

式中:

$m_b$ ——出熔窑玻璃液质量,单位为千克每小时(kg/h)。

9.1.3 输入体系热量计算

9.1.3.1 燃料燃烧热  $Q_{rr}$  (kJ/h)

9.1.3.1.1 当使用重油时:

$$Q_{rr} = m_r \times Q_{rw}^0 \quad \dots\dots\dots(43)$$

式中:

$m_r$ ——进体系燃料质量,单位为千克每小时(kg/h);

$Q_{rw}^0$ ——重油低位发热量,单位为千焦耳每千克(kJ/kg),计算方法见附录 C。

9.1.3.1.2 当使用气体燃料时:

$$Q_{rr} = V_{or} \times Q_{rw}^0 \quad \dots\dots\dots(44)$$

式中:

$V_{or}$ ——进体系气体燃料量,单位为立方米每小时(m<sup>3</sup>/h);

$Q_{rw}^0$ ——气体燃料低位发热值,单位为千焦耳每立方米(kJ/m<sup>3</sup>),计算方法见附录 C。

9.1.3.2 燃料显热  $Q_{rx}$  (kJ/h)

9.1.3.2.1 当使用重油时:

$$Q_{rx} = m_r \times c_r \times t_r \quad \dots\dots\dots(45)$$

式中:

$m_r$ ——进体系燃料质量,单位为千克每小时(kg/h);

$c_r$ ——重油入体系时的平均比热容,单位为千焦耳每千克每度[kJ/(kg·K)],按式(46)计算;

$$c_r = 1.74 + 0.0025t_r \quad \dots\dots\dots(46)$$

$t_r$ ——重油入体系时温度,单位为摄氏度(°C)。

9.1.3.2.2 当使用气体燃料时:

$$Q_{rx} = V_{or} \times c_{qr} \times t_{qr} \quad \dots\dots\dots(47)$$

式中:

$V_{or}$ ——进体系气体燃料量,单位为立方米每小时(m<sup>3</sup>/h);

$c_{qr}$ ——气体燃料在 0 °C ~  $t_{qr}$  °C 时的平均比热容,单位为千焦耳每立方米每度[kJ/(m<sup>3</sup>·K)],比照式(38)计算;

$t_{qr}$ ——气体燃料入体系时温度,单位为摄氏度(°C)。

9.1.3.3 助燃介质显热  $Q_{rx}$  (kJ/h)

9.1.3.3.1 当使用助燃空气时

$$Q_{rx} = V_{air} \times c_k \times t_k \quad \dots\dots\dots(48)$$

式中:

$V_{air}$ ——进换热器助燃冷风量,单位为立方米每小时(m<sup>3</sup>/h);

$c_k$ ——助燃空气在 0 °C ~  $t_k$  °C 时的平均比热容,单位为千焦耳每立方米每度[kJ/(m<sup>3</sup>·K)],查附录 F 表 F.2;

$t_k$ ——助燃空气入体系时温度,单位为摄氏度(°C)。

9.1.3.3.2 当使用助燃氧气时

$$Q_{rx} = V_{O_2} \times c_{O_2} \times t_{O_2} \quad \dots\dots\dots(49)$$

式中:

$V_{O_2}$ ——氧气入体系时的流量,单位为立方米每小时(m<sup>3</sup>/h);

$c_{O_2}$ ——氧气在 0 °C ~  $t_{O_2}$  °C 时的平均比热容,单位为千焦耳每立方米每度[kJ/(m<sup>3</sup>·K)],比照式(39)计算;

$t_{ya}$ ——氧气入体系时的温度,单位为摄氏度(°C)。

9.1.3.4 雾化介质带入热量  $Q_{wx}$  (kJ/h)

9.1.3.4.1 压缩空气作雾化介质时:

$$Q_{wx} = V_{wk} \times c_{wk} \times t_{wk} \dots\dots\dots (50)$$

式中:

$V_{wk}$ ——雾化压缩空气流量,单位为立方米每小时( $m^3/h$ );

$c_{wk}$ ——雾化压缩空气在  $0\text{ }^\circ\text{C} \sim t_{wk}\text{ }^\circ\text{C}$  时的平均比热容,单位为千焦尔每立方米每度 [ $\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$ ],查附录 F 表 F.2;

$t_{wk}$ ——雾化压缩空气入体系温度,单位为摄氏度(°C)。

9.1.3.4.2 蒸汽作雾化介质时:

$$Q_{wx} = m_w \times i'' \dots\dots\dots (51)$$

式中:

$m_w$ ——雾化蒸汽质量,单位为千克每小时( $\text{kg/h}$ );

$i''$ ——入体系蒸汽热焓,单位为千焦尔每千克( $\text{kJ/kg}$ ),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。

9.1.3.4.3 氧气作雾化介质时:

$$Q_{wx} = V_{wya} \times c_{wya} \times t_{wya} \dots\dots\dots (52)$$

式中:

$V_{wya}$ ——雾化氧气流量,单位为立方米每小时( $m^3/h$ );

$c_{wya}$ ——雾化氧气在  $0\text{ }^\circ\text{C} \sim t_{wya}\text{ }^\circ\text{C}$  时的平均比热容,单位为千焦尔每立方米每度 [ $\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$ ],比照式(39)计算;

$t_{wya}$ ——雾化氧气入体系时温度,单位为摄氏度(°C)。

9.1.3.5 鼓泡空气显热  $Q_g$  (kJ/h)

$$Q_g = 0.077\ 58 \times c_g \times t_g \times \sum_{i=1}^n V_{gi} \dots\dots\dots (53)$$

式中:

$c_g$ ——鼓泡空气在  $0\text{ }^\circ\text{C} \sim t_g\text{ }^\circ\text{C}$  时的平均比热容,单位为千焦尔每立方米每度 [ $\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$ ],查附录 F 表 F.2;

$t_g$ ——鼓泡空气入体系时温度,单位为摄氏度(°C);

$V_{gi}$ ——第  $i$  根鼓泡管进入体系的鼓泡空气量,单位为升每分钟(L/min)。

9.1.3.6 漏入空气显热  $Q_{lx}$  (kJ/h)

9.1.3.6.1 当使用重油时:

$$Q_{lx} = (\alpha_c - \alpha_k) \times V_k^0 \times m_r \times c_1 \times t_1 \dots\dots\dots (54)$$

式中:

$\alpha_c$ ——烟气出体系时的空气系数。计算见附录 G;

$\alpha_k$ ——烟气离开熔化部时平均空气系数;

$V_k^0$ ——理论空气量,单位为立方米每千克( $m^3/kg$ );

$m_r$ ——进体系燃料量,单位为千克每小时( $\text{kg/h}$ );

$c_1$ ——漏入空气在  $0\text{ }^\circ\text{C} \sim t_1\text{ }^\circ\text{C}$  时的平均比热容,单位为千焦尔每立方米每度 [ $\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$ ],查附录 F 表 F.2;

$t_1$ ——漏入空气平均温度,单位为摄氏度(°C)。

9.1.3.6.2 当使用气体燃料时:

$$Q_{lx} = (\alpha_c - \alpha_k) \times V_k^0 \times V_{or} \times c_1 \times t_1 \dots\dots\dots (55)$$

式中:

$V_{gr}$ ——熔窑气体燃料量,单位为立方米每小时( $m^3/h$ )。

9.1.3.7 配合料显热  $Q_{px}$  (kJ/h)

$$Q_{px} = m_b \times Q_6 \quad \dots\dots\dots (56)$$

式中:

$m_b$ ——出熔窑玻璃液质量,单位为千克每小时(kg/h);

$Q_6$ ——熔成每千克玻璃的配合料入窑显热,单位为千焦尔每千克(kJ/kg)。

9.1.3.8 电能供入热  $Q_{jd}$  (kJ/h)

$$Q_{jd} = \sum_{i=1}^n P_{di} \times 3.6 \times 10^3 \quad \dots\dots\dots (57)$$

式中:

$P_{di}$ ——进入熔化部、液流洞上升道等各部分的电功率,单位为千瓦(kW)。

9.1.3.9 输入体系总热量  $Q_{zx}$  (kJ/h)

$$Q_{zx} = Q_{rx} + Q_{rx} + Q_{sx} + Q_{wx} + Q_g + Q_{ix} + Q_{px} + Q_{jd} \quad \dots\dots\dots (58)$$

9.1.4 输出体系热量计算

9.1.4.1 玻璃液带出显热  $Q_{bx}$  (kJ/h)

$$Q_{bx} = m_b \times c_{bc} \times t_{bc} \quad \dots\dots\dots (59)$$

式中:

$m_b$ ——出体系玻璃液质量,单位为千克每小时(kg/h);

$c_{bc}$ ——玻璃液在  $0^\circ C \sim t_{bc}^\circ C$  时的平均比热容,单位为千焦尔每千克每度[kJ/(kg·K)],计算方法见附录 I;

$t_{bc}$ ——玻璃液出熔窑体系时温度,单位为摄氏度( $^\circ C$ )。

9.1.4.2 玻璃液带出潜热  $Q_{bq}$  (kJ/h)

$$Q_{bq} = m_b \times (Q_1 + Q_2 + 2491 \times m_{bf} \times m'_{H_2O}) \quad \dots\dots\dots (60)$$

式中:

$m_b$ ——出熔窑玻璃液质量,单位为千克每小时(kg/h);

$Q_1$ ——硅酸盐形成反应热,单位为千焦尔每千克(kJ/kg);

$Q_2$ ——形成玻璃液耗热,单位为千焦尔每千克(kJ/kg);

$m_{bf}$ ——熔成每千克玻璃液所需粉料(湿基)量,单位为千克每千克(kg/kg);

$m'_{H_2O}$ ——每千克粉料中实测含水质量,单位为千克每千克(kg/kg)。

9.1.4.3 池窑表面散热  $Q_r$  (kJ/h)

$$Q_r = \sum_{i=1}^n (S_{bi} q_{si}) \quad \dots\dots\dots (61)$$

式中:

$S_{bi}$ ——池窑表面第  $i$  部位的表面积,单位为平方米( $m^2$ );

$q_{si}$ ——池窑表面第  $i$  部位的表面热流密度,单位为千焦尔每平方米每度[kJ/( $m^2 \cdot h$ )],用热流计直接测量,或按式(62)计算。

$$q_{si} = \alpha_i \times (t_{wi} - t_{oi}) \quad \dots\dots\dots (62)$$

式中:

$\alpha_i$ ——对流辐射换热系数,单位为千焦尔每平方米每小时每度[kJ/( $m^2 \cdot h \cdot K$ )],按式(63)计算。

$$\alpha_i = A_w \times (t_{wi} - t_{oi})^{1/4} + \frac{20.4 \times \epsilon_i \times \left[ \left( \frac{t_{wi} + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{t_{oi} + 273}{100} \right)^4 \right]}{t_{wi} - t_{oi}} \quad \dots\dots\dots (63)$$



式中：

$A_w$ ——取决于散热面位置的系数，按表 4 取值；

$\epsilon_i$ ——窑墙第  $i$  部位外表面黑度；

$t_{wi}$ ——窑体第  $i$  部位外表面温度，单位为摄氏度(°C)；

$t_{oi}$ ——环境温度，单位为摄氏度(°C)。

表 4  $A_w$  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

9.1.4.4 孔口辐射散热  $Q_{kr}$  (kJ/h)

9.1.4.4.1 孔口敞开时：

$$Q_{kr} = \sum_{i=1}^n \left\{ c_0 \times \left[ \left( \frac{t_{fi} + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{t_{oi} + 273}{100} \right)^4 \right] \times \Phi_i \times S_{ki} \right\} \dots\dots\dots (64)$$

式中：

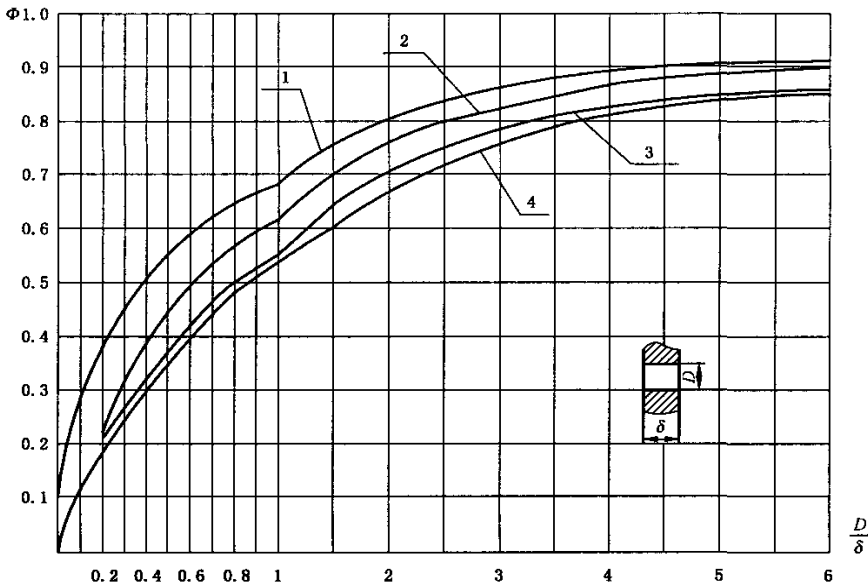
$c_0$ ——黑体辐射系数， $c_0 = 20.4 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{K}^4)$ ；

$t_{fi}$ ——窑体第  $i$  个孔口的辐射温度，单位为摄氏度(°C)；

$t_{oi}$ ——环境温度，单位为摄氏度(°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；

$S_{ki}$ ——窑体第  $i$  个孔口的面积，单位为平方米( $\text{m}^2$ )。



1——伸长的长方形；

2——长方形(2:1)；

3——正方形；

4——圆形；

$\frac{D}{\delta}$ ——孔的直径或最小宽度与墙厚之比。

图 2 门孔系数计算图

## 9.1.4.4.2 孔口用金属板盖住时:

$$Q_{kf} = \sum_{i=1}^n \left\{ \epsilon_m \times c_0 \times \left[ \left( \frac{t_{fi} + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{t_{oi} + 273}{100} \right)^4 \right] \times \frac{\Phi_i}{1 + \Phi_i} \times S_{ki} \right\} \quad \dots\dots\dots (65)$$

式中:

$\epsilon_m$ ——金属板的黑度,一般取  $\epsilon_m = 0.8$ 。

## 9.1.4.4.3 孔口用板砖盖住时:

$$Q_{kf} = 3.6 \times \sum_{i=1}^n \left( \frac{\lambda}{\delta_i} \times S_{ki} \times \Delta t_i \right) \quad \dots\dots\dots (66)$$

式中:

$\lambda$ ——板砖的导热系数,单位为瓦每米每度[W/(m·K)];

$\delta_i$ ——板砖的厚度,单位为米(m);

$S_{ki}$ ——窑体第  $i$  个孔口的面积,单位为平方米(m<sup>2</sup>);

$\Delta t_i$ ——窑体第  $i$  个孔口板砖的内外表面温差,单位为摄氏度(°C)。

9.1.4.5 换热器放空空气散热  $Q_{fx}$  (kJ/h)

$$Q_{fx} = V_{fx} \times t_{fx} \times c_{fx} \quad \dots\dots\dots (67)$$

式中:

$V_{fx}$ ——换热器放空空气量,单位为立方米每小时(m<sup>3</sup>/h);

$t_{fx}$ ——换热器放空空气温度,单位为摄氏度(°C);

$c_{fx}$ ——换热器放空空气在 0 °C ~  $t_{fx}$  °C 时的平均比热容,单位为千焦尔每立方米每度[kJ/(m<sup>3</sup>·K)]。

9.1.4.6 孔口溢流气体显热  $Q_{ky}$  (kJ/h)

$$Q_{ky} = \sum_{i=1}^n (V_{ki} \times c_{ki} \times t_{ki}) \quad \dots\dots\dots (68)$$

式中:

$V_{ki}$ ——窑体第  $i$  个孔口的溢流气体量,单位为立方米每小时(m<sup>3</sup>/h);

$c_{ki}$ ——窑体第  $i$  个孔口的溢流气体在 0 °C ~  $t_{ki}$  °C 时的平均比热容,单位为千焦尔每立方米每度[kJ/(m<sup>3</sup>·K)],比照式(39)计算;

$t_{ki}$ ——窑体第  $i$  个孔口的溢流气体温度,单位为摄氏度(°C)。

9.1.4.7 冷却水带出热  $Q_{ls}$  (kJ/h)

$$Q_{ls} = 4.1868 \sum_{i=1}^n [m_{lsi} \times (t'_{lsi} - t_{lsi})] \quad \dots\dots\dots (69)$$

式中:

$m_{lsi}$ ——进出第  $i$  个冷却水箱的冷却水质量,单位为千克每小时(kg/h);

$t'_{lsi}$ ——第  $i$  个冷却水箱出水温度,单位为摄氏度(°C);

$t_{lsi}$ ——第  $i$  个冷却水箱进水温度,单位为摄氏度(°C)。

9.1.4.8 冷却风带出热  $Q_{lf}$  (kJ/h)

$$Q_{lf} = V_{lf} \times (c'_{lf} \times t'_{lf} - c_{lf} \times t_{lf}) \quad \dots\dots\dots (70)$$

式中:

$V_{lf}$ ——冷却风量,单位为立方米每小时(m<sup>3</sup>/h),用毕托管测量时,计算方法见附录 D;

$c'_{lf}$ ——0 °C ~  $t'_{lf}$  °C 返射风平均比热容,单位为千焦尔每立方米每度[kJ/(m<sup>3</sup>·K)],查附录 F 表 F.2;

$t'_{lf}$ ——吹向窑体后的返射风温度,单位为摄氏度(°C);

$c_{lf}$ ——0 °C ~  $t_{lf}$  °C 冷却风平均比热容,单位为千焦尔每立方米每度[kJ/(m<sup>3</sup>·K)],查附录 F 表 F.2;

$t_{if}$ ——吹向窑体前的冷却风温度,单位为摄氏度(°C)。

9.1.4.9 烟气显热  $Q_{ys}$  (kJ/h)

$$Q_{ys} = V_{oy} \times c_y \times t_y \quad \dots\dots\dots (71)$$

式中:

$V_{oy}$ ——出熔窑体系的烟气流量,单位为立方米每小时( $m^3/h$ );

$c_y$ ——0 °C ~  $t_y$  °C 烟气平均比热容,单位为千焦尔每立方米每度 [ $kJ/(m^3 \cdot K)$ ],比照式(39)计算;

$t_y$ ——烟气出体系时平均温度,单位为摄氏度(°C)。

9.1.4.10 蒸汽潜热  $Q_{wq}$  (kJ/h)

$$Q_{wq} = r \times W_{ym} \times V_{oy} \quad \dots\dots\dots (72)$$

式中:

$r$ ——水的汽化热,单位为千焦尔每千克(kJ/kg);

$W_{ym}$ ——烟气中水汽的质量含量,单位为千克每立方米( $kg/m^3$ ),计算见附录 E;

$V_{oy}$ ——出体系的烟气流量,单位为立方米每小时( $m^3/h$ )。

9.1.4.11 燃料化学不完全燃烧热损失  $Q_{th}$  (kJ/h)

$$Q_{th} = (126 \times V'_{co} + 108 \times V'_{H_2}) \times V_{oy} \quad \dots\dots\dots (73)$$

式中:

$V'_{co}$ 、 $V'_{H_2}$ ——出体系烟气中一氧化碳、氢气的体积百分含量。

9.1.4.12 其他热损失  $Q_{qt}$  (kJ/h)

$$Q_{qt} = Q_{zs} - (Q_{bx} + Q_{bq} + Q_{sr} + Q_{kf} + Q_{ix} + Q_{ky} + Q_{ls} + Q_{lf} + Q_{yq} + Q_{wq} + Q_{rh}) \quad \dots\dots (74)$$

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

9.1.4.13 输出体系总热量  $Q_{zc}$  (kJ/h)

$$Q_{zc} = Q_{bx} + Q_{bq} + Q_{sr} + Q_{kf} + Q_{ix} + Q_{ky} + Q_{ls} + Q_{lf} + Q_{yq} + Q_{wq} + Q_{rh} + Q_{qt} \quad \dots\dots (75)$$

9.1.5 熔窑热平衡表

熔窑热平衡表见表5。

9.2 通路热平衡计算

9.2.1 通路收入热量计算

9.2.1.1 通路输入热  $Q_{shr}$  (kJ/h)

9.2.1.1.1 使用气体燃料时

$$Q_{shr} = V_{tr} \times Q_{dw}^* \quad \dots\dots\dots (76)$$

式中:

$V_{tr}$ ——进入通路的气体燃料量,单位为立方米每小时( $m^3/h$ );

$Q_{dw}^*$ ——通路气体燃料低位发热值,单位为千焦尔每立方米( $kJ/m^3$ )。

9.2.1.1.2 使用电能供给热量时(不包括成型漏板供给电能)

$$Q_{shr} = \sum_{i=1}^n P_{di} \times 3.6 \times 10^3 \quad \dots\dots\dots (77)$$

式中:

$P_{di}$ ——进入通路各部分的电功率,单位为千瓦(kW)。

9.2.1.2 通路气体燃料显热  $Q_{trx}$  (kJ/h)

$$Q_{trx} = V_{tr} \times c_{qr} \times t_{qr} \quad \dots\dots\dots (78)$$

式中:

$c_{qr}$ ——气体燃料在 0 °C ~  $t_{qr}$  °C 时进通路时的平均比热容,单位为千焦尔每立方米每度 [ $kJ/(m^3 \cdot K)$ ],比照式(39)计算;

$t_{qr}$ ——气体燃料进通路时的温度,单位为摄氏度(°C)。

表 5 熔窑热平衡表

输入体系热量				输出体系热量			
序号	项目	数值 kJ/h	百分数 %	序号	项目	数值 kJ/h	百分数 %
1	燃料燃烧热 $Q_{rx}$			1	玻璃液带出显热 $Q_{px}$		
2	燃料显热 $Q_{rx}$			2	玻璃液带出潜热 $Q_{bq}$		
3	助燃介质显热 $Q_{rx}$			3	池窑表面散热 $Q_{rx}$		
4	雾化介质显热 $Q_{rx}$			4	孔口辐射散热 $Q_{rf}$		
5	鼓泡空气显热 $Q_g$			5	换热器放空空气散热 $Q_{ix}$		
6	漏入空气显热 $Q_{ix}$			6	孔口溢流气体显热 $Q_{lx}$		
7	配料料显热 $Q_{px}$			7	冷却水带出热 $Q_{lx}$		
8	电能供给热 $Q_{ed}$			8	冷却风带出热 $Q_{lf}$		
				9	烟气显热 $Q_{rx}$		
				10	蒸汽潜热 $Q_{mq}$		
				11	燃料化学不完全燃料热损失 $Q_{rx}$		
				12	其他热损失 $Q_{rl}$		
合计	输入体系总热量 $Q_{rx}$			合计	输出体系总热量 $Q_{rx}$		

9.2.1.3 通路助燃介质显热  $Q_{rx}$  (kJ/h)

9.2.1.3.1 当使用助燃空气时

$$Q_{rx} = V_{tk} \times c_k \times t_k \quad \dots\dots\dots (79)$$

式中:

$V_{tk}$ ——进通路助燃空气量,单位为立方米每小时( $m^3/h$ );

$c_k$ ——助燃空气在  $0\text{ }^\circ\text{C} \sim t_k\text{ }^\circ\text{C}$  时的平均比热容,单位为千焦尔每立方米每度 [ $\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$ ],查附录 F 表 F.2;

$t_k$ ——助燃空气入体系的温度,单位为摄氏度( $^\circ\text{C}$ ).

9.2.1.3.2 当使用助燃氧气时

$$Q_{rx} = V_{ya} \times c_{ya} \times t_{ya} \quad \dots\dots\dots (80)$$

式中:

$V_{ya}$ ——进通路助燃氧气流量,单位为立方米每小时( $m^3/h$ );

$c_{ya}$ ——氧气在  $0\text{ }^\circ\text{C} \sim t_{ya}\text{ }^\circ\text{C}$  时的平均比热容,单位为千焦尔每立方米每度 [ $\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$ ],比照式(39)计算;

$t_{ya}$ ——助燃氧气进体系的温度,单位为摄氏度( $^\circ\text{C}$ ).

9.2.1.4 玻璃液带入热量  $Q_{lx}$  (kJ/h)

同 9.1.4.1。

9.2.1.5 输入通路总热量  $Q_{rx}$  (kJ/h)

$$Q_{rx} = Q_{shr} + Q_{rx} + Q_{rx} + Q_{lx} \quad \dots\dots\dots (81)$$

9.2.2 通路支出热量

9.2.2.1 成型玻璃液带走热量  $Q_{cb}$  (kJ/h)

$$Q_{cb} = \sum_{i=1}^n (m_{cbi} \times c_{cbi} \times t_{cbi}) \quad \dots\dots\dots (82)$$

式中:

- $m_{cbi}$ ——第  $i$  块漏板玻璃液流量,单位为千克每小时(kg/h);
- $c_{cbi}$ ——玻璃在  $0\text{ }^{\circ}\text{C} \sim t_{cbi}\text{ }^{\circ}\text{C}$  时的平均比热容,单位为千焦耳每千克每度[kJ/(kg·K)];
- $t_{cbi}$ ——第  $i$  块流液槽砖中玻璃液的温度,单位为摄氏度( $^{\circ}\text{C}$ )。

9.2.2.2 放料玻璃流股带走的热量  $Q_n$  (kJ/h)

$$Q_{fb} = m_{fb} \times c_{fb} \times t_{fb} \quad \dots\dots\dots (83)$$

式中:

- $m_{fb}$ ——放料玻璃液的质量,单位为千克每小时(kg/h);
- $c_{fb}$ ——玻璃液在  $0\text{ }^{\circ}\text{C} \sim t_{fb}\text{ }^{\circ}\text{C}$  时的平均比热容,单位为千焦耳每千克每度[kJ/(kg·K)];
- $t_{fb}$ ——放料玻璃液温度,单位为摄氏度( $^{\circ}\text{C}$ )。

9.2.2.3 通路表面散热  $Q_{sr}$  (kJ/h)

$$Q_{sr} = \sum_{i=1}^n (q_{sri} \times S_{bi}) \quad \dots\dots\dots (84)$$

式中:

- $n$ ——通路表面的测定部位数;
- $q_{sri}$ ——通路第  $i$  部位表面散热热流密度,单位为千焦耳每平方米每度[kJ/( $\text{m}^2 \cdot \text{h}$ )],用热流计直接测量,或按式(62)计算;
- $S_{bi}$ ——通路表面第  $i$  部位的表面积,单位为平方米( $\text{m}^2$ )。

9.2.2.4 通路烟气带走热量  $Q_{tyq}$  (kJ/h)

$$Q_{tyq} = \sum_{i=1}^n (V_{tyi} \times c_{tyi} \times t_{yi}) \quad \dots\dots\dots (85)$$

式中:

- $n$ ——烟囱的数量;
- $V_{tyi}$ ——第  $i$  个烟囱的烟气流量,单位为立方米每小时( $\text{m}^3/\text{h}$ );
- $c_{tyi}$ ——第  $i$  个烟囱烟气在  $0\text{ }^{\circ}\text{C} \sim t_{yi}\text{ }^{\circ}\text{C}$  时的平均比热容,单位为千焦耳每千克每度[kJ/(kg·K)],比照式(39)计算;
- $t_{yi}$ ——第  $i$  个烟囱烟气的温度,单位为摄氏度( $^{\circ}\text{C}$ )。

9.2.2.5 通路水箱冷却水带走热量  $Q_{th}$  (kJ/h)

$$Q_{th} = 4.1868 \sum [m_{lxi} \times (t'_{lxi} - t_{lxi})] \quad \dots\dots\dots (86)$$

式中:

- $m_{lxi}$ ——进出第  $i$  个冷却水箱的冷却水量,单位为千克每小时(kg/h);
- $t'_{lxi}$ ——第  $i$  个冷却水箱的出水温度,单位为摄氏度( $^{\circ}\text{C}$ );
- $t_{lxi}$ ——第  $i$  个冷却水箱的进水温度,单位为摄氏度( $^{\circ}\text{C}$ )。

9.2.2.6 通路孔口辐射热损失  $Q_{kr}$  (kJ/h)

$$Q_{kr} = c_0 \sum_{i=1}^n \left\{ \left[ \left( \frac{t_{fi} + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{t_{oi} + 273}{100} \right)^4 \right] \times \Phi_i \times S_{ki} \right\} \quad \dots\dots\dots (87)$$

式中:

- $c_0$ ——黑体辐射系数;
- $t_{fi}$ ——通路第  $i$  个孔口的辐射温度,单位为摄氏度( $^{\circ}\text{C}$ );
- $t_{oi}$ ——环境温度,单位为摄氏度( $^{\circ}\text{C}$ );
- $\Phi_i$ ——通路第  $i$  个孔口的门孔系数,取决于孔的形状、尺寸及窑墙厚度,查图 2;
- $S_{ki}$ ——通路第  $i$  个孔口的面积,单位为平方米( $\text{m}^2$ )。

9.2.2.7 通路其他热损失  $Q_{\text{qt}}$  (kJ/h)

$$Q_{\text{qt}} = Q_{\text{ts}} - (Q_{\text{cb}} + Q_{\text{fb}} + Q_{\text{tar}} + Q_{\text{tyq}} + Q_{\text{ds}} + Q_{\text{tkf}}) \dots\dots\dots (88)$$

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

9.2.2.8 输出通路总热量  $Q_{\text{tc}}$  (kJ/h)

$$Q_{\text{tc}} = Q_{\text{cb}} + Q_{\text{fb}} + Q_{\text{tar}} + Q_{\text{tyq}} + Q_{\text{ds}} + Q_{\text{tkf}} + Q_{\text{qt}} \dots\dots\dots (89)$$

9.2.3 通路热平衡表

通路热平衡表见表6。

表6 通路热平衡表

输入体系热量				输出体系热量			
序号	项目	数值 kJ/h	百分数 %	序号	项目	数值 kJ/h	百分数 %
1	通路输入热 $Q_{\text{in}}$			1	成型玻璃液带走热量 $Q_{\text{cb}}$		
2	气体燃料显热 $Q_{\text{tr}}$			2	放料玻璃液带走热量 $Q_{\text{fb}}$		
3	助燃介质显热 $Q_{\text{ts}}$			3	通路表面散热 $Q_{\text{tar}}$		
4	玻璃液带入热量 $Q_{\text{bx}}$			4	通路烟气带走热量 $Q_{\text{tyq}}$		
				5	水箱冷却水带走热量 $Q_{\text{ds}}$		
				6	辐射热损失 $Q_{\text{tkf}}$		
				7	其他热损失 $Q_{\text{qt}}$		
合计	输入通路总热量 $Q_{\text{is}}$			合计	输出通路总热量 $Q_{\text{tc}}$		

10 热效率计算

10.1 熔窑热效率  $\eta$  (%)

$$\eta = \frac{Q_{\text{yx}}}{Q_{\text{ts}}} \times 100\% \dots\dots\dots (90)$$

式中：

$Q_{\text{yx}}$ ——熔窑有效热，单位为千焦尔每小时(kJ/h)；

$Q_{\text{ts}}$ ——输入熔窑体系总热量，单位为千焦尔每小时(kJ/h)。

10.2 全窑(熔窑+通路)热效率  $\eta_z$  (%)

$$\eta_z = \frac{Q_{\text{yx}}}{Q_{\text{ts}} + Q_{\text{is}} - Q_{\text{bx}}} \times 100\% \dots\dots\dots (91)$$

式中：

$Q_{\text{is}}$ ——输入通路总热量，单位为千焦尔每小时(kJ/h)；

$Q_{\text{bx}}$ ——玻璃液带入通路热量，单位为千焦尔每小时(kJ/h)。

10.3 熔窑单位玻璃能耗  $q_{\text{rh}}$  (kJ/kg)

$$q_{\text{rh}} = \frac{Q_{\text{ts}}}{m_b} \dots\dots\dots (92)$$

式中：

$Q_{\text{ts}}$ ——输入熔窑体系总热量，单位为千焦尔每小时(kJ/h)；

$m_b$ ——玻璃液质量，单位为千克每小时(kg/h)。

10.4 全窑(熔窑+通路)单位玻璃的能耗  $q_{qb}$  (kJ/kg)

$$q_{qb} = \frac{Q_{zs} + Q_{tz} - Q_{bx}}{m_b} \dots\dots\dots (93)$$

式中:

$Q_{zs}$ ——输入熔窑体系总热量,单位为千焦尔每小时(kJ/h);

$Q_{tz}$ ——输入通路总热量,单位为千焦尔每小时(kJ/h);

$Q_{bx}$ ——玻璃液带入通路热量,单位为千焦尔每小时(kJ/h);

$m_b$ ——玻璃液质量,单位为千克每小时(kg/h)。

附 录 A  
(规范性附录)  
符号与单位

符号与单位见表 A.1。

表 A.1

序号	符号	说 明	单 位
1	$A_w$	取决于散热面位置的系数	
2	$c_b$	玻璃液的平均比热容	$\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
3	$c_{bc}$	玻璃液出熔窑体系时的平均比热容	$\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
4	$c_{cbf}$	玻璃液出流液槽砖的平均比热容	$\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
5	$c_{bl}$	玻璃在理论澄清温度时的平均比热容	$\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
6	$c_{fb}$	玻璃液放料流股的平均比热容	$\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
7	$c_n$	粉料入窑时的平均比热容	$\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
8	$c_{fg}$	逸出气体在理论澄清温度时的平均比热容	$\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$
9	$c_k$	助燃空气入体系时的平均比热容	$\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$
10	$c_l$	漏入空气的平均比热容	$\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$
11	$c_{lf}$	吹向窑体前的冷却风平均比热容	$\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$
12	$c'_{lf}$	吹向窑体后的反射风平均比热容	$\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$
13	$c_o$	黑体辐射系数	$\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4 \cdot \text{h})$
14	$c_{pi}$	气体中第 $i$ 组分的平均定压比热容	$\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$
15	$c_{qr}$	气体燃料入体系时的平均比热容	$\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$
16	$c_s$	碎玻璃入窑时的平均比热容	$\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
17	$c_{wk}$	雾化用压缩空气入体系时的平均比热容	$\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$
18	$c_y$	烟气出体系时的平均比热容	$\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$
19	$c_{yo}$	氧气进体系时的平均比热容	$\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$
20	$c_{yi}$	通路第 $i$ 个烟囱烟气平均比热容	$\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$
21	$c_{ki}$	窑体第 $i$ 个孔口的溢流气体平均比热容	$\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$
22	$c_x$	重油入体系时的平均比热容	$\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
23	$c_{wya}$	雾化氧气入体系时的平均比热容	$\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$
24	$c_{fk}$	换热器放空空气在出体系时的平均比热容	$\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$
25	$c_g$	鼓泡空气入体系时的平均比热容	$\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$
26	$d_e$	孔口当量直径	m
27	$I$	平均电流	A
28	$I_i$	测定的某次电流	A
29	$I'$	入体系蒸汽比热焓	$\text{kJ}/\text{kg}$
30	$K_d$	毕托管校正系数	



表 A.1 (续)

序号	符号	说 明	单 位
31	$K_i$	电流互感器倍率	
32	$K_u$	电压互感器倍率	
33	$m_b$	出熔窑体系玻璃液质量(进通路玻璃液质量)	kg/h
34	$m_{bt}$	熔成每千克玻璃液所需粉料(湿基)量	kg/kg
35	$m_{bu}$	熔制每千克玻璃液所需废丝量	kg/kg
36	$m_{cb}$	通路成型玻璃液质量	kg/h
37	$m_i$	每付粉料(湿基)的质量	kg
38	$m_{ia}$	每千克粉料(湿基)中逸出气体的质量	kg/kg
39	$m_{ib}$	每千克粉料(湿基)配成配合料时添加的碎玻璃量	kg/kg
40	$m_g$	鼓泡空气质量	kg/h
41	$m_{H_2O}$	每千克粉料中含有效水质量	kg/kg
42	$m'_{H_2O}$	每千克粉料中实测含水质量	kg/kg
43	$m_{bi}$	每千克粉料(湿基)中,各种原料引入的分解氧化物质量	kg/kg
44	$m_{ky}$	溢流气体质量	kg/h
45	$m_l$	漏入空气质量	kg/h
46	$m_s$	工业摄像机镜头用压缩空气质量	kg/h
47	$m_{si}$	第 <i>i</i> 块漏板满筒玻璃纤维原丝(扣除水分和浸润剂)质量	kg
48	$m_{lai}$	进出第 <i>i</i> 个冷却水箱的冷却水质量	kg/h
49	$m_p$	入窑配合料质量	kg/h
50	$m_{fk}$	换热器放空空气质量	kg/h
51	$m_{qt}$	出体系其他物料质量	kg/h
52	$m_{nl}$	进换热器助燃冷风质量	kg/h
53	$m_r$	进体系燃料质量	kg/h
54	$m_w$	雾化介质质量	kg/h
55	$m_y$	出体系烟气质量	kg/h
56	$m_{zt}$	进体系助燃介质质量	kg/h
57	$m_{zc}$	出体系物料总质量	kg/h
58	$m_{zs}$	进体系物料总质量	kg/h
59	$m_{tr}$	进通路燃气质量	kg/h
60	$m_{tzt}$	进通路助燃介质质量	kg/h
61	$m_{tyn}$	进通路氧气质量	kg/h
62	$m_{ts}$	进通路物料总质量	kg/h
63	$m_{ty}$	出通路烟气质量	kg/h
64	$m_{fb}$	放料玻璃液总流量	kg/h
65	$m_{cb}$	通路成型玻璃液质量	kg/h

表 A.1 (续)

序号	符号	说 明	单 位
66	$m_{iq}$	出通路其他物料质量	kg/h
67	$m_{isc}$	出通路物料总质量	kg/h
68	$m_{cbi}$	第 $i$ 块漏板玻璃液流量	kg/h
69	$n_p$	测定期间平均日投料付数	
70	$V_{N_2}$	气体燃料中氮气中的体积分数	%
71	$V'_{N_2}$	烟气中氮气的体积分数	%
72	$V_{O_2}$	气体燃料中氧气的体积分数	%
73	$V'_{O_2}$	烟气中氧气的体积分数	%
74	$V_s$	工业摄像机镜头用压缩空气体积流量	L/min
75	$V_{CH_4}$	气体燃料中甲烷的体积分数	%
76	$V_{C_nH_m}$	气体燃料中不饱和烃的体积分数	%
77	$V_{CO}$	气体燃料中一氧化碳的体积分数	%
78	$V'_{CO}$	烟气中一氧化碳的体积分数	%
79	$V_{CO_2}$	气体燃料中二氧化碳的体积分数	%
80	$V'_{CO_2}$	烟气中二氧化碳的体积分数	%
81	$V_{H_2}$	气体燃料中氢气的体积分数	%
82	$V'_{H_2}$	烟气中氢气的体积分数	%
83	$P$	大气压	Pa
84	$P_{cp}$	平均电功率	kW
85	$P_{di}$	供入体系各部分电功率	kW
86	$\Delta P_i$	测流量断面内第 $i$ 点的动压值	Pa
87	$P_j$	测流量断面内的静压	Pa
88	$\Delta P_{\text{静}}$	孔口内外静压差	Pa
89	$q_i$	各种原料硅酸盐形成反应热(以千克分解氧化物计)	kJ/kg
90	$Q_1$	硅酸盐形成反应耗热	kJ/kg
91	$Q_2$	形成玻璃液耗热	kJ/kg
92	$Q_3$	加热玻璃液到理论澄清温度耗热	kJ/kg
93	$Q_4$	蒸发有效水分耗热	kJ/kg
94	$Q_5$	加热配合料逸出气体各组分到玻璃液理论澄清温度耗热	kJ/kg
95	$Q_6$	配合料入窑显热	kJ/kg
96	$Q_6$	熔成每千克玻璃液理论耗热量	kJ/kg
97	$Q_{bx}$	玻璃液带出熔窑显热(玻璃液带入通路显热)	kJ/h
98	$Q_{bq}$	玻璃液带出潜热	kJ/h
99	$Q_{cb}$	通路成型玻璃液带走热量	kJ/h
100	$Q_{\text{低}}$	燃料低位发热量	kJ/kg 或 kJ/m <sup>3</sup>

表 A.1 (续)

序号	符号	说 明	单 位
101	$Q_{rb}$	放料玻璃液流股带走的热量	kJ/h
102	$Q_{ed}$	电能供入热	kJ/h
103	$Q_{ef}$	孔口辐射散热	kJ/h
104	$Q_{ex}$	助燃介质显热	kJ/h
105	$Q_{ey}$	孔口溢流气体显热	kJ/h
106	$Q_{ff}$	冷却风带出热	kJ/h
107	$Q_{fb}$	冷却水带出热	kJ/h
108	$Q_{fx}$	漏入空气显热	kJ/h
109	$Q_{px}$	配合料显热	kJ/h
110	$Q_{gr}$	电供给热	kJ/h
111	$Q_{qt}$	其他热损失	kJ/h
112	$Q_{zh}$	燃料化学不完全燃烧热损失	kJ/h
113	$Q_{rr}$	燃料燃烧热	kJ/h
114	$Q_{rx}$	燃料显热	kJ/h
115	$Q_{sr}$	池容表面散热	kJ/h
116	$Q_{rx}$	进换热器冷助燃空气显热	kJ/h
117	$Q_{gx}$	鼓泡空气显热	kJ/h
118	$Q_{wq}$	蒸汽潜热	kJ/h
119	$Q_{wx}$	雾化介质带入热量	kJ/h
120	$Q_{yx}$	烟气显热	kJ/h
121	$Q_{yx}$	有效热	kJ/h
122	$Q_{zc}$	输出体系总热量	kJ/h
123	$Q_{za}$	输入熔容体系总热量	kJ/h
124	$Q_{zhr}$	通路输入热	kJ/h
125	$Q_{zrx}$	通路气体燃料显热	kJ/h
126	$Q_{zrx}$	通路助燃介质显热	kJ/h
127	$Q_{za}$	输入通路总热量	kJ/h
128	$Q_{zsr}$	通路表面散热	kJ/h
129	$Q_{zyq}$	通路烟气带走热量	kJ/h
130	$Q_{zb}$	通路冷却水带走热量	kJ/h
131	$Q_{zef}$	通路孔口辐射热损失	kJ/h
132	$Q_{zqt}$	通路其他热损失	kJ/h
133	$Q_{zrc}$	输出通路总热量	kJ/h
134	$Q_{fx}$	换热器放空空气带走热量	kJ/h
135	$q_{sr}$	池容表面第 $i$ 部位的表面热流密度	kJ/(m <sup>2</sup> ·h)

表 A.1 (续)

序号	符号	说 明	单 位
136	$q_{th}$	熔窑单位玻璃的能耗	kJ/kg
137	$q_{gh}$	全窑(熔窑+通路)单位玻璃的能耗	kJ/kg
138	$r$	水的汽化热	kJ/kg
139	$S_{bi}$	熔窑表面第 $i$ 部位的表面积	$m^2$
140	$S_d$	测流量断面的截面积	$m^2$
141	$S_{ki}$	窑体第 $i$ 个孔口的面积	$m^2$
142	$S_{tbi}$	通路表面第 $i$ 部位的表面积	$m^2$
143	$t_{bc}$	玻璃液出熔窑体系时温度	$^{\circ}C$
144	$t_{cbi}$	出第 $i$ 块流液槽砖中玻璃液的温度	$^{\circ}C$
145	$t_{bl}$	玻璃液理论澄清温度	$^{\circ}C$
146	$t_{fi}$	窑体第 $i$ 个孔口的辐射温度	$^{\circ}C$
147	$t_{fb}$	放料玻璃液温度	$^{\circ}C$
148	$t_{fl}$	粉料入窑温度	$^{\circ}C$
149	$\Delta t_i$	窑体第 $i$ 个孔口板砖的内外表面温差	$^{\circ}C$
150	$t_k$	助燃空气入体系时温度	$^{\circ}C$
151	$t_l$	漏入空气平均温度	$^{\circ}C$
152	$t_g$	鼓泡空气入熔窑体系时的温度	$^{\circ}C$
153	$t_{if}$	吹向窑体前的冷却风温度	$^{\circ}C$
154	$t'_{if}$	吹向窑体后的返射风温度	$^{\circ}C$
155	$t_{lai}$	第 $i$ 个冷却水箱进水温度	$^{\circ}C$
156	$t'_{lai}$	第 $i$ 个冷却水箱出水温度	$^{\circ}C$
157	$t_{oi}$	环境温度	$^{\circ}C$
158	$t_q$	测流量断面内的气体平均温度	$^{\circ}C$
159	$t_{qr}$	气体燃料入体系温度	$^{\circ}C$
160	$t_r$	重油流经流量计时的温度	$^{\circ}C$
161	$t_s$	碎玻璃入窑温度	$^{\circ}C$
162	$t_{wi}$	窑体第 $i$ 部位外表面温度	$^{\circ}C$
163	$t_{wk}$	压缩空气入体系时温度	$^{\circ}C$
164	$t_{ya}$	助燃氧气入体系时的温度	$^{\circ}C$
165	$t_{wya}$	雾化氧气入体系时的温度	$^{\circ}C$
166	$t_y$	烟气出体系时平均温度	$^{\circ}C$
167	$t_{yi}$	通路第 $i$ 个烟囱烟气温度	$^{\circ}C$
168	$t_{ki}$	窑体第 $i$ 个孔口溢流气体温度	$^{\circ}C$
169	$t_{fk}$	换热器放空空气温度	$^{\circ}C$
170	$t_z$	重油入体系时温度	$^{\circ}C$

表 A.1 (续)

序号	符号	说 明	单 位
171	$U$	平均电压	V
172	$U_i$	测定的某次电压	V
173	$V_{i_0}$	每千克粉料中逸出气体的体积	$\text{m}^3/\text{kg}$
174	$V_{a_i}$	容内第 $i$ 根鼓泡管鼓入空气流量	L/min
175	$V_k^0$	理论空气量	$\text{m}^3/\text{kg}$ 或 $\text{m}^3/\text{m}^3$
176	$V_{lf}$	冷却风量	$\text{m}^3/\text{h}$
177	$V_{ox}$	熔容气体燃料量	$\text{m}^3/\text{h}$
178	$V_{rf}$	进换热器助燃冷风量	$\text{m}^3/\text{h}$
179	$V_{fk}$	换热器放空空气流量	$\text{m}^3/\text{h}$
180	$V_{oq}$	测流量断面内气体(烟气、空气、煤气等)的流量	$\text{m}^3/\text{h}$
181	$V_{wk}$	雾化压缩空气流量	$\text{m}^3/\text{h}$
182	$V_{wyo}$	雾化用氧气流量	$\text{m}^3/\text{h}$
183	$V_{oy}$	出熔容体系的烟气流量	$\text{m}^3/\text{h}$
184	$V_{oys}$	进熔容体系助燃氧气量	$\text{m}^3/\text{h}$
185	$V_r$	测定期间平均日耗油量	$\text{m}^3/\text{d}$
186	$V_{lyi}$	通路第 $i$ 个烟囱的烟气流量	$\text{m}^3/\text{h}$
187	$V_{li}$	容体第 $i$ 个孔口的溢流气体量	$\text{m}^3/\text{h}$
188	$V_{tr}$	进通路燃气流量	$\text{m}^3/\text{h}$
189	$V_{tk}$	进通路助燃空气流量	$\text{m}^3/\text{h}$
190	$V_{tys}$	进通路助燃氧气流量	$\text{m}^3/\text{h}$
191	$V_{lyi}$	通路第 $i$ 个烟道的烟气流量	$\text{m}^3/\text{h}$
192	$W_{ym}$	烟气中水蒸气的质量含量	$\text{kg}/\text{m}^3$
193	$W_i$	电度表或瓦特表某次测定值	kWh
194	$\Delta W$	首末电度表的数差值	kWh
195	$X_i$	气体中各组分的体积分数	%
196	$\omega_i$	测流量断面内第 $i$ 点气体流速	m/s
197	$w_S$	燃料中硫的质量分数	%
198	$w_C$	燃料中碳的质量分数	%
199	$w_H$	燃料中氢的质量分数	%
200	$w_N$	燃料中氮的质量分数	%
201	$w_O$	燃料中氧的质量分数	%
202	$\alpha$	空气系数	
203	$\alpha_c$	烟气出体系时空气系数	
204	$\alpha_i$	对流辐射换热系数	$\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{K})$
205	$\alpha_k$	烟气离开熔化部时平均空气系数	

表 A.1 (续)

序号	符号	说 明	单 位
206	$\beta$	重油的体积膨胀系数	
207	$\delta$	窑墙厚度	m
208	$\delta_i$	板砖厚度	M
209	$\epsilon_i$	窑墙第 $i$ 部位外表面黑度	
210	$\epsilon_m$	金属板黑度	
211	$\eta$	熔窑热效率	%
212	$\eta_n$	全窑(熔窑+通路)热效率	%
213	$\lambda$	板砖的导热系数	W/(m·K)
214	$\mu_i$	窑体第 $i$ 个孔口的溢流系数	
215	$\rho_0$	标准状态下气体的密度	kg/m <sup>3</sup>
216	$\rho_{0i}$	标准状态下气体中各组分的密度	kg/m <sup>3</sup>
217	$\rho_{0O_2}$	标准状态下氧气的密度	kg/m <sup>3</sup>
218	$\rho_{20}$	20℃时重油的密度	kg/m <sup>3</sup>
219	$\rho_t$	重油流经流量计时的密度	kg/m <sup>3</sup>
220	$\rho_{cyi}$	通路第 $i$ 个烟道的烟气密度	kg/m <sup>3</sup>
221	$\tau_{mi}$	各块漏板拉制满筒原丝所用时间	min
222	$\Phi_i$	门孔系数	

**附录 B**  
(规范性附录)

**单元窑基本情况及热平衡参数测定结果记录表**

单元窑基本情况及热平衡参数测定结果记录表见表 B.1~表 B.7。

**表 B.1 单元窑基本情况**

工厂名称			
工厂厂址			
窑的编号			
熔窑类型			
燃料种类	单元窑		通路
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	投料池长×宽	m	
4	燃烧器数量	个	
5	流液洞长×宽×高	m	
6	金属换热器高×直径	m	
7	总换热面积	m <sup>2</sup>	
8	单相供电电极对数或三相供电区域数		
9	鼓泡器数量		
10	通路形式		
11	漏板数量及孔数		

**表 B.2 单元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	熔化部燃料消耗量	t/d 或 m <sup>3</sup> /d		
4	熔化部助熔电功率	kW		
5	通路燃料消耗量	m <sup>3</sup> /d		
6	每公斤玻璃液耗热量	kJ/kg		
7	每公斤玻璃液耗电量	kWh/kg		

表 B.3 玻璃成分

	w(SiO <sub>2</sub> )	w(B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	w(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	w(Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	w(CaO)	w(MgO)	w(Na <sub>2</sub> O)	w(K <sub>2</sub> O)	w(FeO)	w(F)
设计成分%										
分析成分%										

表 B.4 投料量及出料量表

日期	理论产量/(t/d)	成品产量/(t/d)	干配合料/(t/d)	废丝玻璃量/(t/d)
平均				

表 B.5 原料成分和料方

原料名称	每付料质量/kg	w(SiO <sub>2</sub> )	w(B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	w(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	w(Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	w(CaO)	w(MgO)	w(Na <sub>2</sub> O)	w(K <sub>2</sub> O)	w(BaO)	w(PbO)	烧失量
	m <sub>1</sub>											
	m <sub>i</sub>											
	m <sub>n</sub>											
水分	m <sub>n+1</sub>											
合计	$\sum_{i=1}^{n+1} m_i$											

注 1: 水分: m<sub>n+1</sub> 包括原料中原有水分和外加水。

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

注 3: 含碎玻璃量:  $m_{i0} = \frac{\text{碎玻璃量}}{\sum_{i=1}^{n+1} m_i}$ 。



表 B.6 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 $Q_{wv}$		$kJ/kg$		
		组成	C		%	
			H			
			O			
			N			
	S					
	A (灰含量)					
	W (水含量)					
	煤气	静压 $P_j$		Pa		
		密度 $\rho_0$		$kg/m^3$		
		流量 $V_{or}$		$m^3/h$		
		温度 $t_{qr}$		$^{\circ}C$		
应用基低位发热量 $Q_{wv}$		$kJ/m^3$				
燃料	煤气	组成	$V_{CO}$			
			$V_{CH_4}$			
			$V_{H_2}$			
			$V_{C_nH_m}$			
			$V_{CO_2}$			
			$V_{O_2}$			
			$V_{N_2}$			
			$V_{H_2O}$			
助燃空气	静压 $P_j$		Pa			
	动压(平均值) $\frac{\sum_{i=1}^n \sqrt{\Delta P_i}}{n}$					
	测量断面的截面积 $S_d$		$m^2$			
	温度 $t_k$		$^{\circ}C$			
	流量 $V_{ok}$		$m^3/h$			

表 B.6 (续)

测定项目		单位	数值	
助燃氧气	静压 $P_j$	Pa		
	温度 $t_k$	℃		
	流量 $V_{oy}$	m <sup>3</sup> /h		
	组成	$V_{O_2}$	%	
$V_{N_2}$				
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 或 kg/h		
漏入空气	烟气出体系时空气系数 $\alpha_c$			
	烟气离开熔化部时平均空气系数 $\alpha_k$			
	理论空气量 $V_k$	m <sup>3</sup> /kg 或 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>		
	温度 $t_l$	℃		
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 $n_p$			
	每付粉料(湿基)的质量 $m_t$	kg		
玻璃液	出体系时温度 $t_{bc}$	℃		
	玻璃液质量 $m_b$	kg/h		
	理论澄清温度 $t_{cl}$	℃		
	满筒玻璃纤维原丝(扣除水分和浸润剂)质量 $m_w$	kg		
	每小时的原丝筒数 $n$			
烟气	静压 $P_i$	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 $V_{oy}$	m <sup>3</sup> /h		
	组成	$V'_{CO}$	%	
		$V'_{CO_2}$		
$V'_{O_2}$				
$V'_{N_2}$				
$V'_{H_2O}$				

表 B.6 (续)

测定项目		单位	数值
冷却水	熔窑	进水温度 $t_{1s}$	℃
		出口温度 $t'_{1s}$	℃
		流量	kg/h
	通路	进水温度 $t_{1s}$	℃
		出水温度 $t'_{1s}$	℃
		流量	kg/h
冷却风	静压 $P_s$		Pa
	动压(平均值) $\frac{\sum_{i=1}^n \sqrt{\Delta P_i}}{n}$		
	温度 $t_{1f}, t'_{1f}$		℃
	测流量断面的截面积 $S_d$		m <sup>2</sup>
	流量 $V_{1f}$		m <sup>3</sup> /h
孔口溢流气体	孔口内外静压差 $\Delta P_{1s}$		Pa
	温度 $t_{1y}$		℃
	孔口面积 $S_{1s}$		m <sup>2</sup>
	溢流气体量 $V_{1y}$		m <sup>3</sup> /h
	组成	$V'_{CO}$	%
		$V'_{H_2}$	
		$V'_{CH_4}$	
		$V'_{CO_2}$	
		$V'_{O_2}$	
		$V'_{N_2}$	
$V'_{H_2O}$			
表面散热	测点数 $n_b$		个
	表面积 $S_w$		m <sup>2</sup>
	表面散热量 $Q_{sr}$		kJ/(m <sup>2</sup> ·h)
	表面温度 $t_{wi}$		℃
	环境温度 $t_{oi}$		
	表面黑度 $\epsilon_i$		
	位置系数 $A_w$		
孔口辐射	孔内温度 $t_{ri}$		℃
	环境温度 $t_{oi}$		
	孔口面积 $S_w$		m <sup>2</sup>
	门孔系数 $\Phi_i$		
大气压 $P$		Pa	

表 B.7 电能记录表

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
时间/min	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
$W_i$										
$U_i$										
$I_i$										

电流倍率  $K_i$ ：

电压倍率  $K_v$ ：

测量仪表型号：

测定时间：

测定区位：

**附录 C**  
**(规范性附录)**  
**燃料低位发热量的计算**

**C.1 液体燃料低位发热量  $Q_{L,w}$  (kJ/kg)**

C.1.1 已知燃料的元素分析时:

$$Q_{L,w} = 339w_C + 1030w_H - 109(w_O - w_S) - 25w_W \dots\dots\dots (C.1)$$

式中:

$w_C, w_H, w_O, w_S, w_W$ ——分别表示应用基时燃料中碳、氢、氧、硫、水的质量分数。

C.1.2 已知重油的相对密度时,可查表 C.1 得到重油的低位发热量。

**表 C.1 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 $Q_{L,w}$ kJ/kg	相对密度 $d_{15}^{15}$	低位发热量 $Q_{L,w}$ 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	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	0.898 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:  $d_{15}^{15}$  为 15 °C 时重油密度与 15 °C 时水的密度之比。

C.1.3 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/T 384 进行。

**C.2 气体燃料低位发热量  $Q_{L,w}$  (kJ/m<sup>3</sup>)**

$$Q_{L,w} = 126V_{CO} + 108V_{H_2} + 358V_{CH_4} + 590V_{C_2H_4} + 637V_{C_2H_6} + 806V_{C_3H_8} + 912V_{C_3H_6} + 1187V_{C_4H_{10}} + 1460V_{C_5H_{12}} + 232V_{H_2S} \dots\dots\dots (C.2)$$

式中:

$V_{CO}, V_{H_2}, V_{CH_4}, V_{C_2H_4}, V_{C_2H_6}, V_{C_3H_8}, V_{C_3H_6}, V_{C_4H_{10}}, V_{H_2S}$ ——气体燃料中各可燃组分的体积分数。

**附录 D**  
**(规范性附录)**

**测定气体流量时测点的选择与计算方法**

**D.1 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,则应尽可能选择较适宜的部位作为测定截面。

**D.2 测定方法**

**D.2.1 圆形管道**

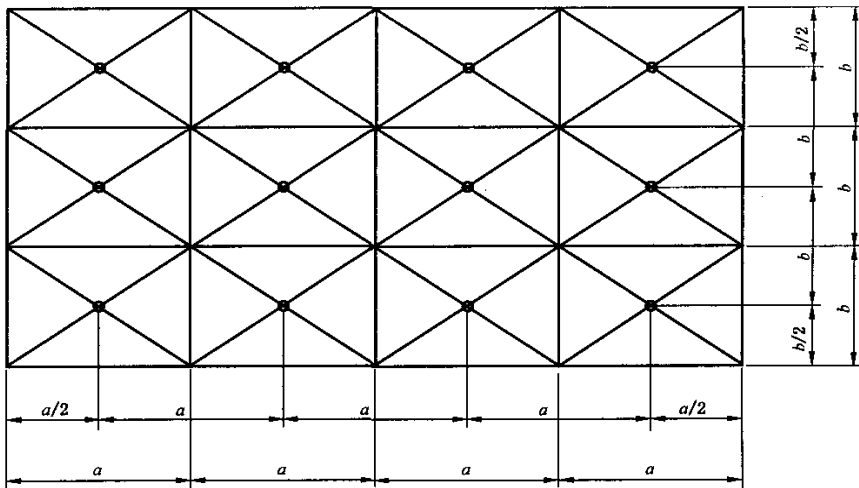
采用对数线性法求平均流速的测点位置(测点在相距 $90^\circ$ 的四个半径上取),取法见表D.1。

**表 D.1 圆形管道测点位置**

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

**D.2.2 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D.1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D.2中所列的数值。



**图 D.1 矩形截面测点分布图**

**表 D.2 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

D.3 计算方法

D.3.1 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  $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$ , 然后求得该截面流体的平均流速  $\omega$ , 单位为米每秒(m/s)。

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

式中:

$K_d$ ——毕托管校正系数;

$n$ ——测点数;

$\Delta P_i$ ——各测点的动压值,单位为帕斯卡(Pa);

$\rho_t$ ——工作状态下气体的密度,单位为千克每立方米(kg/m<sup>3</sup>),按式(D.2)计算。

$$\rho_t = \rho_0 \frac{273}{273 + t} \dots\dots\dots (D.2)$$

式中:

$\rho_0$ ——标准状态下气体的密度,单位为千克每立方米(kg/m<sup>3</sup>),按式(D.3)计算。

$t$ ——管道内气体温度,单位为摄氏度(°C)

$$\rho_0 = 0.01 \sum X_i \rho_{0i} \dots\dots\dots (D.3)$$

$X_i$ ——气体中各种成分的百分含量;

$\rho_{0i}$ ——各种气体成分在标准状态下的密度,单位为千克每立方米(kg/m<sup>3</sup>),见附录 F 表 F.1。

D.3.2 气体的平均流量

$$V_0 = 3\,600 F \omega \times \frac{P + P_j}{101\,325} \times \frac{273}{273 + t} \dots\dots\dots (D.4)$$

式中:

$V_0$ ——标准状态下气体的平均流量,单位为立方米每小时(m<sup>3</sup>/h);

$F$ ——管道截面积,单位为平方米(m<sup>2</sup>);

$P$ ——大气压,单位为帕斯卡(Pa);

$P_j$ ——管道内气体静压,单位为帕斯卡(Pa)。

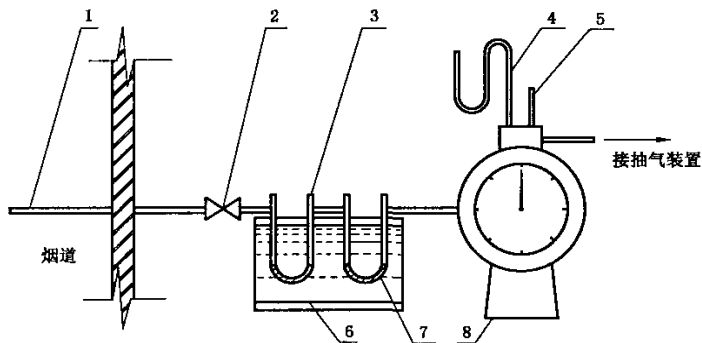
**附录 E**  
(规范性附录)  
**烟气中水分含量测定方法**

**E.1 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。

**E.2 测定装置**

测定装置如图 E.1 所示。



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

图 E.1 水分测量采样装置图

**E.3 测定步骤**

**E.3.1** 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。

**E.3.2** 取样装置按图 E.1 连接,检查系统无漏气现象后,打开 U 型管进口阀,以一定的流量抽气。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。

**E.4 计算公式**

$$W_{ym} = \frac{m_w}{\frac{22.4}{18} \times m_w + V_y \times \frac{P_i + P}{101325} \times \frac{273}{273 + t_y}} \times 100 \quad \dots\dots\dots (E.1)$$



$$W_y = \frac{\frac{22.4}{18} m_w}{\frac{22.4}{18} \times m_w + V_y \times \frac{P_j + P}{101\,325} \times \frac{273}{273 + t_y}} \times 100 \quad \dots\dots\dots (E.2)$$

式中：

- $W_{ym}$ ——烟气中水分的质量浓度,单位为千克每立方米(kg/m<sup>3</sup>);
- $m_y$ ——吸湿剂吸收的水量,单位为克(g);
- $V_y$ ——流量计显示的烟气流量,单位为升(L);
- $P_j$ ——压力计显示的烟气静压,单位为帕斯卡(Pa);
- $P$ ——大气压,单位为帕斯卡(Pa);
- $W_y$ ——烟气中水分的体积分数(%);
- $t_y$ ——温度计显示的烟气温度,单位为摄氏度(°C)。

**E.5 注意事项**

- E.5.1 采样前应检查整个采样系统,使之不存在漏气现象。
- E.5.2 采样管应插入烟道截面中部。
- E.5.3 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。
- E.5.4 抽气装置的抽力要保持稳定。
- E.5.5 U 型管外表面须擦干,不能高温烘干。

附 录 F  
(规范性附录)  
各类数据表

各类数据表见表 F.1~表 F.5。

表 F.1 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 $Q_{L,0}$ 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	$6.24 \times 10^4$
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	
水蒸气	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 F.2 常用气体的平均定压比热容  $c_p$

kJ/(m<sup>3</sup>·K)

温度 ℃	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

表 F.2 (续)

kJ/(m<sup>3</sup>·K)

温度 ℃	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>
900	2.179	1.380	1.465	1.696	1.398	1.323	1.403	1.830	2.215
1000	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 F.3 烃类气体的平均定压比热容 c<sub>p</sub>

kJ/(m<sup>3</sup>·K)

温度 ℃	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>5</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 F.4 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(标准 体积)/(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

表 F.4 (续)

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(标准 体积)/(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
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	1.70	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>2</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。

表 F.5 饱和水蒸气物理参数

温度 t/ ℃	压力 P/ kPa	密度 ρ/ (kg/m <sup>3</sup> )	汽化热 r/ (kJ/kg)	比热容 c <sub>p</sub> / kJ/(kg·K)	导热系数 λ/[10 <sup>-2</sup> W/ (m·K)]	热扩散率 α/ (10 <sup>-5</sup> m <sup>2</sup> /s)	运力黏度 μ/ (10 <sup>-6</sup> Pa·K)	运动黏度 ν/ (10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> /s)
100	101.3	0.598	2 257	2.14	2.37	18.6	11.97	20.02
110	143	0.826	2 230	2.18	2.49	13.8	12.45	15.07
120	199	1.121	2 203	2.21	2.59	10.5	12.85	11.46
130	270	1.496	2 174	2.26	2.69	7.97	13.20	8.85
140	362	1.966	2 145	2.32	2.79	6.13	13.50	6.89
150	476	2.547	2 114	2.39	2.88	4.728	13.90	5.47
160	618	3.258	2 083	2.48	3.01	3.722	14.30	4.39
170	792	4.122	2 050	2.58	3.13	2.939	14.70	3.57
180	1 003	5.157	2 015	2.71	3.27	2.340	15.10	2.93
190	1 255	6.394	1 979	2.86	3.42	1.870	15.60	2.44
200	1 555	7.862	1 941	3.02	3.55	1.490	16.00	2.03
210	1 908	9.588	1 900	3.20	3.72	1.210	16.40	1.71
220	2 320	11.62	1 858	3.41	3.90	0.983	16.80	1.45
230	2 798	13.99	1 813	3.63	4.10	0.806	17.30	1.24
240	3 348	16.76	1 766	3.88	4.30	0.658	17.80	1.06
250	3 978	19.98	1 716	4.16	4.51	0.544	18.20	0.913

附录 G  
(规范性附录)

理论空气量、烟气体积及空气系数计算

G.1 理论空气量  $V_k^0$  和理论烟气体积  $V_y^0$  的计算

G.1.1 液体燃料理论空气量  $V_k^0, \text{m}^3/\text{kg}$ , 理论烟气体积  $V_y^0, \text{m}^3/\text{kg}$ ,

$$V_k^0 = \frac{0.203Q_{dw}^y}{1000} + 2 \quad \dots\dots\dots (G.1)$$

$$V_y^0 = \frac{0.265Q_{dw}^y}{1000} \quad \dots\dots\dots (G.2)$$

G.1.2 气体燃料理论空气量  $V_k^0, \text{m}^3/\text{m}^3$ , 理论烟气体积  $V_y^0, \text{m}^3/\text{m}^3$

G.1.2.1 煤气

当  $Q_{dw}^y > 12500 \text{ kJ}/\text{m}^3$  时,

$$V_k^0 = \frac{0.26Q_{dw}^y}{1000} - 0.25 \quad \dots\dots\dots (G.3)$$

$$V_y^0 = \frac{0.272Q_{dw}^y}{1000} + 0.25 \quad \dots\dots\dots (G.4)$$

G.1.2.2 天然气

$$V_k^0 = \frac{0.2639Q_{dw}^y}{1000} + 0.02 \quad \dots\dots\dots (G.5)$$

$$V_y^0 = \frac{0.2639Q_{dw}^y}{1000} + 1.02 \quad \dots\dots\dots (G.6)$$

G.2 过剩空气系数的计算

$$\alpha = \frac{V'_{N_2}}{V'_{N_2} - \left( V'_{O_2} - \frac{1}{2}V'_{CO} - \frac{1}{2}V'_{H_2} - 2V'_{CH_4} \right) \times \frac{79}{21}} \quad \dots\dots\dots (G.7)$$

式中:

$V'_{N_2}$ 、 $V'_{O_2}$ 、 $V'_{CO}$ 、 $V'_{H_2}$ 、 $V'_{CH_4}$ ——分别表示烟气中氮气、氧气、一氧化碳、氢气和甲烷的体积分数。

附录 H  
(规范性附录)

每千克粉料(湿基)逸出气体产物量和形成氧化物量计算

H.1 每千克粉料(湿基)逸出气体产物量计算

见表 H.1。

表 H.1 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					合计
		V <sub>CO<sub>2</sub></sub>	V <sub>NO<sub>2</sub></sub>	V <sub>SO<sub>2</sub></sub>	V <sub>H<sub>2</sub>O</sub>	V <sub>O<sub>2</sub></sub>	
硅砂	$m_{CO_2} = m_1 / \sum_{i=1}^{n+1} m_i \times LOI\%$						
...							
水	$m_{H_2O} = m_{n+1} / \sum_{i=1}^{n+1} m_i$						
合计(kg/kg)							$m_{i_0}$
体积 = $\frac{\text{质量}}{\text{分子量}} \times 22.4$							$V_{i_0}$
体积分数/%							100
注 1: 其他原料逸出气体产物见附录 F 表 F.4。							
注 2: 当原料实测含水率小于 5% 时, 按实测含水率计算, 当实测水分大于 5% 时, 按 5% 计算。							

H.2 每千克粉料(湿基)形成氧化物量计算

见表 H.2。

表 H.2 形成氧化物量计算

原料名称	形成氧化物量计算式	氧化物量									合计	
		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
硅砂	$m_{SiO_2} = m_1 / \sum_{i=1}^{n+1} m_i \times w_{SiO_2} \%$											
	$m_{Al_2O_3} = m_1 / \sum_{i=1}^{n+1} m_i \times w_{Al_2O_3} \%$											
	$m_{Fe_2O_3} = m_1 / \sum_{i=1}^{n+1} m_i \times w_{Fe_2O_3} \%$											
	$m_{CaO} = m_1 / \sum_{i=1}^{n+1} m_i \times w_{CaO} \%$											
	$m_{MgO} = m_1 / \sum_{i=1}^{n+1} m_i \times w_{MgO} \%$											
	$m_{Na_2O} = m_1 / \sum_{i=1}^{n+1} m_i \times w_{Na_2O} \%$											
	$m_{K_2O} = m_1 / \sum_{i=1}^{n+1} m_i \times w_{K_2O} \%$											
合计, kg												
玻璃计算成分(%) = $\frac{\text{氧化物量}}{\text{氧化物总量}} \times 100$												100%

附录 I  
(规范性附录)

玻璃液理论澄清温度和平均比热容计算方法

I.1 玻璃液理论澄清温度的计算

I.1.1 按温度-黏度曲线确定

I.1.1.1 按实测的该玻璃的温度-黏度曲线,取黏度 10 Pa·s 时所对应的温度为该玻璃的理论澄清温度。

I.1.1.2 如需外延温度-黏度曲线才能求出理论澄清温度,则必须遵循下列原则:

a) 外延前对温度-黏度曲线按式(I.1)进行非线性化回归。

$$\lg\eta = A + \frac{B}{T^2} \quad \dots\dots\dots(I.1)$$

式中:

$\eta$ ——玻璃液黏度,单位为帕斯卡秒(Pa·s);

A、B——常数;

T——绝对温度,单位为开氏度(K)。

b) 采用曲线板直接外延。

I.1.2 按玻璃类型确定

I.1.2.1 一般方法

一般按式(I.2)计算玻璃液理论澄清温度。对含氟玻璃,理论澄清温度按计算值下降 10%~15%计。

$$T = \frac{B'}{A' + \lg\eta} + T_0 \quad \dots\dots\dots(I.2)$$

式中:

T——玻璃液理论澄清温度,单位为开氏度(K);

A'、B'、T<sub>0</sub>——根据玻璃组分计算得到的数值。

$$A' = -1.478 8P_{Na_2O} + 0.835P_{K_2O} + 1.603 0P_{CaO} + 5.493 6P_{MgO} - 1.518 3P_{Al_2O_3} + 1.455 0$$

$$B' = -6 039.7P_{Na_2O} - 1 439.6P_{K_2O} - 3 919.3P_{CaO} + 6 285.3P_{MgO} + 2 253.4P_{Al_2O_3} + 5 736.4$$

$$T_0 = -25.07P_{Na_2O} - 321.0P_{K_2O} + 544.3P_{CaO} - 384.0P_{MgO} + 294.4P_{Al_2O_3} + 198.1$$

式中:

P<sub>Na<sub>2</sub>O</sub>、P<sub>K<sub>2</sub>O</sub>、……——分别表示玻璃中各组分摩尔数与 SiO<sub>2</sub> 摩尔数之比。

I.1.2.2 E 玻璃、离心喷吹与火焰喷吹玻璃棉,按式(I.3)计算理论澄清温度。

$$t_{bl} = t_0 + \sum_{i=1}^n P_i C_i \quad \dots\dots\dots(I.3)$$

式中:

t<sub>bl</sub>——玻璃液理论澄清温度,单位为摄氏度(°C);

t<sub>0</sub>——1 345 °C;

P<sub>i</sub>——组成玻璃各氧化物质量分数(%);

C<sub>i</sub>——氧化物计算系数,见表 I.1。

表 I.1 氧化物计算系数

氧化物	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O
C <sub>i</sub>	4.467 5	1.962 4	-4.051 3	-1.363 8	-4.871 5	-10.594 0	-8.217 8

I.1.2.3 硼硅酸盐、乳白玻璃按式(I.4)计算理论澄清温度

$$t_{bl} = 1\,240 + 40K \quad \dots\dots\dots (I.4)$$

式中:

$t_{bl}$ ——玻璃液理论澄清温度,单位为摄氏度(°C);

$K$ ——玻璃的熔融系数,按式(I.5)或式(I.6)计算:

当  $w_{B_2O_3} < 15\%$  时

$$K = \frac{w_{SiO_2} + w_{Al_2O_3} + w_{ZrO_2}}{2.0w_{F_2} + 1.5w_{Li_2O} + w_{Na_2O} + 0.75w_{K_2O} + 0.50w_{B_2O_3} + 0.25w_{PbO} + 0.20w_{BaO}} \quad \dots\dots\dots (I.5)$$

当  $w_{B_2O_3} > 15\%$  时

$$K = \frac{w_{SiO_2} + w_{Al_2O_3} + w_{ZrO_2}}{2.0w_{F_2} + 1.5w_{Li_2O} + w_{Na_2O} + 0.75w_{K_2O} + 0.25w_{PbO} + 0.20w_{BaO} + 0.20w_{B_2O_3}} \quad \dots\dots\dots (I.6)$$

式中:

$w_{SiO_2}, w_{Al_2O_3}, \dots, w_{B_2O_3}, w_{PbO}, w_{BaO}$ ——分别为玻璃中该组分的质量分数。

I.1.2.4 中碱纤维玻璃,按式(I.7)计算:

$$t_{bl} = a_0 + a_1 \times 2 + a_2 \times 2^2 + a_3 \times 2^3 \quad \dots\dots\dots (I.7)$$

式中:

$t_{bl}$ ——玻璃液理论澄清温度;

$a_0, a_1, a_2, a_3$ ——与玻璃组分有关的温度系数,

$$a_0 = 2\,909.46 - 44.858w_{Na_2O} - 38.323w_{CaO} - 22.754w_{MgO} + 8.579w_{Al_2O_3} \quad \dots\dots (I.8)$$

$$a_1 = -543.757\,5 + 9.902\,0w_{Na_2O} + 9.601\,3w_{CaO} + 6.796w_{MgO} - 0.754\,4w_{Al_2O_3} \quad \dots\dots (I.9)$$

$$a_2 = 46.579\,9 - 0.930\,57w_{Na_2O} - 0.742\,13w_{CaO} - 0.570\,5w_{MgO} + 0.011\,40w_{Al_2O_3} \quad \dots\dots (I.10)$$

$$a_3 = -1.414\,017 + 0.030\,53w_{Na_2O} + 0.019\,206w_{CaO} + 0.013\,65w_{MgO} + 0.001\,376w_{Al_2O_3} \quad \dots\dots (I.11)$$

I.2 玻璃液平均比热容计算

采用夏普法计算:

$$c_b = \frac{1}{0.001\,46t + 1} [w_1(a_1t + c_1) + w_2(a_2t + c_2) + \dots + w_i(a_it + c_i)] \quad \dots\dots (I.12)$$

式中:

$c_b$ ——0 °C~ $t$  °C时玻璃液平均比热容,单位为千焦尔每千克每度[kJ/(kg·°C)];

$t$ ——玻璃液温度,单位为摄氏度(°C);

$w_1, w_2, \dots, w_i$ ——分别为玻璃组分中各氧化物的质量分数;

$a_1, a_2, \dots, a_i$ ——与氧化物种类有关的常数,见表 I.2;

$c_1, c_2, \dots, c_i$ ——与氧化物种类有关的常数,见表 I.2。

表 I.2 夏普比热容计算常数表

	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



参 考 文 献

- [1] 孙承绪. 玻璃工业热工设备[M]. 武汉: 武汉工业大学出版社, 1996.
  - [2] JC/T 488—1992 玻璃池窑热平衡测定与计算方法[S].
  - [3] 西北轻工业学院. 玻璃工艺学[M]. 北京: 轻工业出版社, 1982.
-