

# 空气、煤气双预热蓄热室格子体热平衡计算

唐福恒<sup>1</sup> 徐姗姗<sup>2</sup>

(1. 北京长城工业炉技术中心 北京市 102208;

2. 秦皇岛玻璃工业研究设计院 秦皇岛市 066000)

**摘要** 对燃发生炉煤气玻璃熔窑进入空气和煤气双蓄热室烟气量的分配比进行了计算, 并分别对空气蓄热室和煤气蓄热室的格子体做了热平衡计算, 还对全窑的热平衡和燃烧温度进行了计算。

**关键词** 玻璃熔窑 蓄热室 发生炉煤气 燃烧温度 格子体

中图分类号: TQ171 文献标识码: A 文章编号: 1003-1987(2015)11-0003-05

## Thermal Balance Computation of Checkers in Air-gas Double Preheated Regenerator

Tang Fuheng<sup>1</sup>, Xu Shanshan<sup>2</sup>

(1. Technical center of Beijing great wall industrial furnace, Beijing, 102208;

2. Qinhuangdao glass industry research & design institute, Qinhuangdao, 066000)

**Abstract:** The distribution amount ratio of flue gas entering air-gas double regenerators of glass furnace which uses producer gas as its fuel was calculated. Thermal balance computation of checkers in both air and gas regenerators was carried out. Thermal balance calculation of whole furnace and combustion temperature were also conducted.

**Key Words:** glass furnace, regenerator, producer gas, combustion temperature, checker

## 0 引言

某新建浮法玻璃熔窑, 设计熔化能力 $P=600$  t/d, 以双段式发生炉热煤气为燃料, 煤气热值 $Q_d=6\ 500$  kJ (1 550 kcal) /Nm<sup>3</sup>, 设计单耗 $r=7\ 540$  kJ (1 800 kcal) /kg<sub>玻璃</sub>。采用助燃空气和煤气双预热蓄热室, 拟定将助燃空气从100℃预热到1 110℃, 双段式发生炉煤气从200℃预热到770℃, 以提高火焰温度和节能降耗。

## 1 进入空气、煤气蓄热室格子体的烟气量分配

### 1.1 全窑发生炉煤气、助燃空气、烟气量计算

① 发生炉煤气耗量:

$$\begin{aligned} MQ &= \frac{P \cdot 10^3 \cdot r}{Q_d \times 24} \\ &= \frac{600 \times 1\ 000 \times 7\ 540}{6\ 500 \times 24} \\ &= 29\ 000 \text{ (Nm}^3/\text{h)} \end{aligned}$$

$$= 8.06 \text{ Nm}^3/\text{s}$$

② 发生炉煤气的单位理论助燃空气耗量:

$$\begin{aligned} L_0 &= \frac{0.2Q_d}{1000} + 0.03 \\ &= \frac{0.2 \times 6500}{1\ 000} + 0.03 \\ &= 1.3 + 0.03 \\ &= 1.33 \text{ (Nm}^3/\text{Nm}^3) \end{aligned}$$

③ 实际助燃空气耗量 (空气过剩系数 $\alpha=1.15$ , 标准状态):

$$\begin{aligned} KQ &= \alpha \cdot L_0 \cdot MQ \\ &= 1.15 \times 1.33 \times 8.06 \\ &= 12.33 \text{ (Nm}^3/\text{s)} \\ &= 44\ 400 \text{ Nm}^3/\text{h} \end{aligned}$$

④ 产生的烟气量为:

$$\begin{aligned} YQ &= \left( \alpha \cdot L_0 + 0.98 - \left( \frac{0.03 \cdot Q_d}{1\ 000} \right) \right) \cdot MQ \\ &= \left( 1.15 \times 1.33 + 0.98 - \frac{0.03 \times 6\ 500}{1\ 000} \right) \times 8.06 \end{aligned}$$

$$= 18.66 \text{ (Nm}^3\text{/s)}$$

$$= 67\,200 \text{ Nm}^3\text{/h}$$

## 1.2 烟气、空气、煤气进出格子体的温度及其热容量

① 空气和煤气的预热温度与蓄热室的排烟温度是互相锁定关系：

助燃空气（和/或煤气）的预热温度与从蓄热室格子体下方排出的烟气温度之间是互相关联锁定的。这两个温度并不是一次都能同时准确拟定出来的，而是需要通过多次试算才能确认下来，其步骤包括：对可变值做出初步设定→热平衡计算→逐步调整可变值→经过多次循环计算之后确定结果。本熔窑的最后计算结果如下。

② 本熔窑烟气、空气、煤气的温度情况：

从熔窑排出的高温烟气经过小炉进入蓄热室，到达格子体顶部时温度已经降低了很多，一般按1450℃考虑。本熔窑拟定烟气在空气格子体内从1450℃降低到600℃排出，在煤气格子体内从1450℃降低到730℃排出，才能使助燃空气从100℃预热到1110℃，发生炉热煤气从制气站的煤气发生炉输送到熔窑煤气蓄热室格子体下方时按200℃考虑，预热到770℃。

③ 烟气、空气、煤气进出格子体的温度及其热容量见表1。

表1 烟气、空气、煤气进出格子体的温度及其热容量

| 项目         | 温度/℃           | 气体热容量<br>/kJ·Nm <sup>-3</sup> ·℃ <sup>-1</sup> |
|------------|----------------|--|
| 烟气进空气格子体温度 | $t_{KY1}=1450$ | $C_{YQ1450}=1.629$                             |
| 烟气出空气格子体温度 | $t_{KY2}=600$  | $C_{YQ600}=1.482$                              |
| 空气进空气格子体温度 | $t_{KQ1}=100$  | $C_{KQ100}=1.323$                              |
| 空气出空气格子体温度 | $t_{KQ2}=1110$ | $C_{KQ1100}=1.449$                             |
| 烟气进煤气格子体温度 | $t_{MY1}=1450$ | $C_{YQ1450}=1.629$                             |
| 烟气出煤气格子体温度 | $t_{MY2}=730$  | $C_{YQ730}=1.507$                              |
| 煤气进煤气格子体温度 | $t_{MQ1}=200$  | $C_{MQ200}=1.340$                              |
| 煤气出煤气格子体温度 | $t_{MQ2}=770$  | $C_{MQ770}=1.423$                              |

## 1.3 助燃空气预热需要的烟气体积

① 助燃空气预热需要吸收的热量：

$$\begin{aligned} Q_{KQYR} &= KQ \cdot (C_{KQ1100} \cdot t_{KQ2} - C_{KQ100} \cdot t_{KQ1}) \\ &= 12.33 (1.449 \times 1110 - 1.323 \times 100) \\ &= 18\,200 \text{ (kJ/s)} \end{aligned}$$

② 烟气流过空气蓄热室格子体放出的热量：

$$\begin{aligned} Q_{KQFC} &= C_{YQ1450} \cdot t_{KY1} - C_{YQ600} \cdot t_{KY2} \\ &= 1.629 \times 1\,450 - 1.482 \times 600 \\ &= 1\,473 \text{ (kJ/Nm}^3\text{)} \end{aligned}$$

③ 助燃空气预热需要的烟气体积（烟气在空气格子体内放出热量的5%被散失掉，预热回收率  $\eta = 0.95$ ）：

$$\begin{aligned} V_{KQYQ} &= Q_{KQYR} / (\eta \cdot Q_{KQFC}) \\ &= 18\,200 / (0.95 \times 1\,473) \\ &= 13.01 \text{ (Nm}^3\text{)} \end{aligned}$$

## 1.4 煤气预热需要的烟气体积

① 煤气预热需要吸收的热量：

$$\begin{aligned} Q_{MQYR} &= MQ \cdot (C_{MQ770} \cdot t_{MQ2} - C_{MQ200} \cdot t_{MQ1}) \\ &= 8.06 \times (1.423 \times 770 - 1.340 \times 200) \\ &= 6\,674 \text{ (kJ/s)} \end{aligned}$$

② 烟气在煤气蓄热室放出热量：

$$\begin{aligned} Q_{MQFC} &= C_{YQ1450} \cdot t_{MY1} - C_{YQ730} \cdot t_{MY2} \\ &= 1.629 \times 1\,450 - 1.507 \times 730 \\ &= 1\,262 \text{ (kJ/Nm}^3\text{)} \end{aligned}$$

③ 煤气预热需要的烟气体积（烟气在煤气格子体内放出热量的5%被散失掉，预热回收率 = 0.95）：

$$\begin{aligned} V_{MQYQ} &= Q_{MQYR} / (\eta \cdot Q_{MQFC}) \\ &= 6\,674 / (0.95 \times 1\,262) \\ &= 5.57 \text{ (Nm}^3\text{)} \end{aligned}$$

## 1.5 确定空气蓄热室和煤气蓄热室的烟气体量分配

① 进入空气蓄热室与煤气蓄热室的烟气体量分配比例，就是助燃空气预热需要的烟气体积与发生炉煤气预热需要的烟气体积之比。分配比例为：

$$K = 13.01/5.57 \approx 70 : 30$$

②进入空气蓄热室的烟气量:

$$\begin{aligned} YQ_1 &= YQ \cdot 70\% \\ &= 18.66 \times 70\% \\ &= 13.062 \text{ (Nm}^3/\text{s)} \\ &\approx 13.1 \text{ Nm}^3/\text{s} \\ &= 47\,000 \text{ Nm}^3/\text{h} \end{aligned}$$

③进入煤气蓄热室的烟气量:

$$\begin{aligned} YQ_2 &= YQ \cdot 30\% \\ &= 18.66 \times 30\% \\ &= 5.598 \text{ (Nm}^3/\text{s)} \approx 5.6 \text{ Nm}^3/\text{s} \\ &= 20\,200 \text{ Nm}^3/\text{h} \end{aligned}$$

## 2 空气蓄热室格子体热平衡计算

### 2.1 计算本熔窑空气蓄热室的排烟温度

①预热助燃空气所需热量 (每小时助燃空气量  $KQ = 44\,400 \text{ Nm}^3$ ):

$$\begin{aligned} Q_z &= KQ (C_{KQ1110} \cdot t_{KQ2} - C_{KQ100} \cdot t_{KQ1}) \\ &= 44\,400 \times (1.449 \times 1\,110 - 1.323 \times 100) \\ &= 65\,538\,396 \text{ (kJ/h)} \end{aligned}$$

②计算烟气排出空气格子体温度 (每时进入空气格子体烟气量  $YQ_1 = 47\,000 \text{ Nm}^3$ , 烟气在空气格子体放出热量的5%被散失掉, 预热回收率 = 0.95):

$$\begin{aligned} t_{KY2} &= \frac{1}{C_{YQ600}} \left( C_{YQ1450} \cdot t_{KY1} - \left( \frac{Q_z}{\eta \cdot YQ_1} \right) \right) \\ &= \frac{1}{1.482} \left( 1.629 \times 1\,450 - \frac{65\,538\,396}{0.95 \times 47\,000} \right) \\ &= 603 \text{ (}^\circ\text{C)} \end{aligned}$$

### 2.2 本熔窑空气蓄热室格子体的热平衡计算

①烟气带入空气格子体的热量:

$$\begin{aligned} Q_{YQ1} &= YQ_1 \cdot C_{YQ1450} \cdot t_{KY1} \\ &= 13.1 \times 1.629 \times 1\,450 \\ &= 30\,943 \text{ (kJ/s)} \text{ ----- (100\%)} \end{aligned}$$

②助燃空气预热吸收的热量:

$$\begin{aligned} Q_{KQ1} &= KQ \cdot (C_{KQ1110} \cdot t_{KQ2} - C_{KQ100} \cdot t_{KQ1}) \\ &= 12.33 \times (1.449 \times 1\,110 - 1.323 \times 100) \\ &= 12.33 \times 1476 \\ &= 18\,200 \text{ (kJ/s)} \text{ ----- (58.82\%)} \end{aligned}$$

③烟气从空气格子体下端排出带走的热量:

$$\begin{aligned} Q_{YQc1} &= YQ_1 \cdot C_{YQ600} \cdot t_{KY2} \\ &= 13.1 \times 1.482 \times 600 \\ &= 11\,649 \text{ (kJ/s)} \text{ ----- (37.65\%)} \end{aligned}$$

④蓄热室格子体结构散热 (格子体结构散热大约为烟气带入格子体总热量的3%):

烟气流过格子体放出的热量中, 有大约5%的热量被格子体相对应的蓄热室墙体散失掉。此散失热量大约占进入空气格子体烟气热量的3%。这两个百分比的计算基数不同: 前者占烟气从1450℃降低到600℃过程中放出热量的大约5%, 后者占烟气1450℃带入总热量的大约3%。

$$\begin{aligned} Q_{GZT1} &= Q_{YQ1} - Q_{KQ1} - Q_{YQc1} \\ &= 30\,943 - 18\,200 - 11\,649 \\ &= 1\,094 \text{ (kJ/s)} \text{ ----- (3.53\%)} \end{aligned}$$

## 3 煤气蓄热室格子体热平衡计算

### 3.1 计算本熔窑煤气蓄热室的排烟温度

①预热煤气所需热量 (每小时发生炉煤气量  $MQ = 29\,000 \text{ Nm}^3$ ):

$$\begin{aligned} Q_z &= MQ (C_{MQ770} \cdot t_{MQ2} - C_{MQ200} \cdot t_{MQ1}) \\ &= 29\,000 \times (1.423 \times 770 - 1.340 \times 200) \\ &= 24\,012\,000 \text{ (kJ/h)} \end{aligned}$$

②计算烟气出煤气蓄热室格子体温度 (每时进入煤气格子体烟气量  $YQ_2 = 20\,200 \text{ Nm}^3$ , 烟气在煤气格子体放出热量的约5%被散失掉, 预热回收率 = 0.95):

$$\begin{aligned} t_{MY2} &= \frac{1}{C_{YQ730}} \left( C_{YQ1450} \cdot t_{MY1} - \left( \frac{Q_z}{\eta \cdot YQ_2} \right) \right) \\ &= \frac{1}{1.507} \left( 1.629 \times 1\,450 - \frac{24\,012\,000}{0.95 \times 20\,200} \right) \\ &= 737 \text{ (}^\circ\text{C)} \end{aligned}$$

### 3.2 本熔窑煤气蓄热室格子体的热平衡计算

①烟气带入煤气格子体的热量：

$$Q_{YQJ2} = YQ_2 \cdot C_{YQ1450} \cdot t_{MY1}$$

$$= 5.6 \times 1.629 \times 1450$$

$$= 13227 \text{ (kJ/s)} \text{ ----- (100\%)}$$

②发生炉煤气预热吸收的热量：

$$Q_{KQ2} = MQ \cdot (C_{MQ770} \cdot t_{MQ2} - C_{MQ200} \cdot t_{MQ1})$$

$$= 8.06 \times (1.423 \times 770 - 1.340 \times 200)$$

$$= 6674 \text{ (kJ/s)} \text{ ----- (50.46\%)}$$

③烟气从煤气格子体排出带走的热量：

$$Q_{YQC2} = YQ_2 \cdot C_{YQ730} \cdot t_{MY2}$$

$$= 5.6 \times 1.507 \times 730$$

$$= 6160 \text{ (kJ/s)} \text{ ----- (46.57\%)}$$

④煤气格子体结构散热（煤气格子体结构散热大约为烟气带入格子体总热量的2.5%，计算基数不同）：

$$Q_{GZT2} = Q_{YQJ2} - Q_{KQ2} - Q_{YQC2}$$

$$= 13227 - 6674 - 6160$$

$$= 393 \text{ (kJ/s)} \text{ ----- (2.97\%)}$$

### 4 全窑热平衡计算

(1) 计算本熔窑消耗燃料热量（收入热）：

$$Q_R = MQ \cdot Q = 8.06 \times 6500 = 52390 \text{ (kJ/s)}$$

$$\text{----- (100\%)}$$

(2) 本熔窑玻璃生成耗热量（本熔窑玻璃生成热按 $G = 3015 \text{ kJ (720 kcal) / kg}_{\text{玻璃}}$ 考虑）：

$$Q_G = \frac{P \cdot 10^3 \cdot G}{24 \cdot 3600}$$

$$= \frac{600 \times 10^3 \times 3015}{24 \times 3600}$$

$$= \frac{432000000}{86400}$$

$$= 20938 \text{ (kJ/s)} \text{ ----- (39.97\%)}$$

(3) 烟气从空气、煤气格子体排出带走的总热量：

$$Q_{YQC} = Q_{YQC1} + Q_{YQC2}$$

$$= 11649 + 6160$$

$$= 17809 \text{ (kJ/s)} \text{ ----- (33.99\%)}$$

(4) 窑体结构散失热量：

$$Q_{YT} = Q_R - Q_G - Q_{YQC}$$

$$= 52390 - 20938 - 17809$$

$$= 13643 \text{ (kJ/s)} \text{ ----- (26.04\%)}$$

### 5 燃烧温度计算

(1) 本熔窑以发生炉煤气为燃料的已知数据见表2。

表2 本熔窑以发生炉煤气为燃料的已知数据

| 项目   | 数据                         |
|--|----------------------------|
| 发生炉煤气低发热值 $Q_d / \text{kJ} \cdot \text{Nm}^{-3}$                             | 6500                       |
| 燃烧生成烟气体积 $V / \text{Nm}^3 \cdot \text{Nm}^{-3}$                              | 2.315                      |
| 燃料发生炉煤气预热温度 $t_f / ^\circ\text{C}$   | 770                        |
| 助燃空气预热温度 $t_a / ^\circ\text{C}$  | 1110                       |
| 燃烧生成烟气的热容量 $C_y / \text{kJ} \cdot \text{Nm}^{-3} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$  | 1.6965 (见本表注)              |
| 燃料预热后的热容量 $C_f / \text{kJ} \cdot \text{Nm}^{-3} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$   | 1.423                      |
| 助燃空气预热后的热容量 $C_a / \text{kJ} \cdot \text{Nm}^{-3} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ | 1.449                      |
| 不同空气过剩系数时的单位空气耗量 $L_a / \text{Nm}^3 \cdot \text{Nm}^{-3}$                    | $1.15 \times 1.35 = 1.553$ |

注：根据单位烟气热容量计算通用公式，本熔窑所用发生炉煤气的理论燃烧温度大约为 $2600^\circ\text{C}$ ，则单位烟气热容量为：

$$C_y = 1.4235 + 0.000105t$$

$$= 1.4235 + 0.000105 \times 2600$$

$$= 1.4235 + 0.273$$

$$= 1.6965 \text{ (kJ / (Nm}^3 \cdot ^\circ\text{C))}$$

(2) 本熔窑发生炉煤气的理论燃烧温度：

$$t = \frac{Q_d + C_f t_f + C_a t_a L_a}{C_y V_y}$$

$$= \frac{6500 + 1.423 \times 770 + 1.449 \times 1110 \times 1.553}{1.6965 \times 2.315}$$

$$= \frac{6500 + 1096 + 2498}{3.927}$$

$$= \frac{10094}{3.927}$$

$$= 2570 (\text{℃})$$

(3) 本熔窑的火焰温度(实际燃烧温度):

$$t_H = 0.7 \cdot t_R = 0.7 \times 2570 = 1799 (\text{℃})$$

(4) 本熔窑热点处可达炉壁温度(比火焰温度低200~250℃):

炉壁温度是指工业炉窑的炉膛内侧壁温度,只有炉膛内侧壁温度达到要求并保持稳定之后才能进行正常生产。玻璃熔窑的炉壁温度特指热点处小炉垛内侧壁的温度,燃料火焰温度达到1800℃以上,才能实现热点处的炉壁温度达到1550℃以上,生产高等级玻璃需要炉壁温度更高。

$$t_B = t_H - 200$$

$$= 1799 - (200 \sim 250)$$

$$= 1599 \sim 1549 (\text{℃})$$

(5) 结论:本熔窑以生产建筑级玻璃为

主,热点处炉壁内侧温度需要达到1550℃以上,计算结果表明本熔窑给定条件能够满足这一温度要求。

## 6 结语

(1) 助燃空气(和/或煤气)预热温度与排出的烟气温度是互相锁定的关系。在设计过程中,拟定了其中一个温度就能求出另一个温度;在熔窑运行中,测定出一个温度就能计算出另一个温度。

(2) 双预热蓄热室需要预热的助燃空气和煤气的体积量不同,预热温度也不同,能容纳格子体的蓄热室腔体高度尺寸更不同。按本文提供的计算方法都能够计算出进入空气和煤气蓄热室烟气量的分配比例。对于多数燃发生炉煤气玻璃熔窑来说,进入空气、煤气蓄热室的烟气量分配比7:3都基本适用。

## 高级银镜还原剂

秦皇岛玻璃工业研究设计院自行研制的高级银镜还原剂为国内首创的专利产品,银的转化率在80%以上,银膜厚度均匀,反射率高,经国家玻璃质量监督检验中心检测,各项性能指标均符合标准要求,经国内青岛台玻、秦皇岛耀华优能、张家港华尔润等数条生产线使用,一致反映良好。目前国外同类产品售价在50元人民币/升左右,我院产品仅为28元人民币/升,这样在保证产品质量的前提下,可大大降低国内银镜的生产成本,为生产厂家创造更好的经济效益。

我院拥有雄厚的技术实力,对银镜生产设备及工艺都进行了深入细致的研究工作,为数条生产线进行了技术服务,解决了厂家许多技术难题,积累了丰富的实践经验,并制定了《镀银玻璃镜建材行业标准》(JC/T871-2000)。我们对使用我院产品的客户进行跟踪服务。

秦皇岛玻璃工业研究设计院 银镜玻璃材料技术开发公司

电话:0335-5911596 5911587 传真:0335-5911596

联系人:梁中生 杨晨 13933568908 13933661076