

1 000 t/d浮法玻璃熔窑的单位能耗指标

唐福恒

(北京长城工业炉技术中心 北京市 102208)

摘要 根据通常浮法玻璃熔窑蓄热室的温度参数,首先对千吨级特大吨位浮法玻璃熔窑的基本热平衡进行了计算。对窑体结构散热进行了分析,提出了不同吨位浮法玻璃熔窑的窑体结构散热量与其全窑耐火材料的总重量是成比例的。然后对千吨级特大吨位浮法玻璃熔窑的单位能耗指标进行了不同方案计算对比。

关键词 浮法玻璃 熔窑 能耗指标

中图分类号: TQ171.73 文献标识码: A 文章编号: 1003-1987(2016)03-0016-06

Targeted Value of Unit Energy Consumption of 1000 t/d Float Glass Furnace

TANG Fuheng

(Technical center of Beijing Great-wall industrial furnace, Beijing, 102208)

Abstract: Heat calculation of float glass furnace with over thousand-tonnage was carried out by means of temperature parameters taken from common regenerator of float glass furnace. Heat dissipation of furnace-wall structure was analyzed. It is pointed out that the heat dissipating capacity from various tonnage furnace wall is in proportion to the total mass of refractory used in the whole furnace. Finally comparative calculation of unit energy-consumption target-value for extra-capacity, over a thousand-ton float glass furnace, were conducted.

Key Words: float glass, furnace, target-value of energy-consumption

熔化能力 $P=1\ 000\ \text{t/d}$ 的特大吨位浮法玻璃熔窑,燃重油,重油热值 $Q_d=40\ 000\ \text{kJ/kg}$,采用预热空气助燃。熔化部池宽 $12\ 000\ \text{mm}$,熔化部池长 $43\ 000\ \text{mm}$,7对小炉,熔化区池长 $26\ 000\ \text{mm}$,熔化率 $3.2\ \text{t}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 。

1 1 000 t/d浮法玻璃熔窑的基本热平衡计算

根据熔窑吨位越大单位能耗越低的规律,初步设定本 $1\ 000\ \text{t/d}$ 浮法玻璃熔窑的单位能耗 $r=5\ 860\ \text{kJ}(1\ 400\ \text{kcal})/\text{kg}_{\text{玻璃液}}$ 。

1.1 全窑基础数据计算

①单位时间燃料耗量:

$$\begin{aligned} R_h &= P \cdot 10^3 r / Q_d \\ &= 1\ 000 \times 1\ 000 \times 5\ 860 / 40\ 000 \\ &= 146.5\ (\text{t/d}) \\ &= 6\ 104\ \text{kg/h} \end{aligned}$$

$$= 1.695\ 9\ \text{kg/s}$$

②全窑实际助燃空气耗量($\alpha=1.15$):

$$\begin{aligned} KQ &= \alpha \cdot L_0 \cdot R_h \\ &= 1.15 \left(\frac{0.2 \cdot Q_d}{1\ 000} + 2 \right) \cdot R_h \\ &= 1.15 \times \left(\frac{0.2 \times 40\ 000}{1\ 000} + 2 \right) \times 1.6956 \\ &= 19.5\ (\text{Nm}^3/\text{s}) \end{aligned}$$

③产生的烟气量:

$$\begin{aligned} YQ &= \left[\frac{0.27 \cdot Q_d}{1\ 000} + (\alpha - 1) \cdot L_0 \right] \cdot R_h \\ &= \left[\frac{0.27 \cdot Q_d}{1\ 000} + (\alpha - 1) \cdot \left(\frac{0.2 \cdot Q_d}{1\ 000} + 2 \right) \right] \cdot R_h \\ &= \left[\frac{0.27 \times 40\ 000}{1\ 000} + (1.15 - 1) \times \left(\frac{0.2 \times 40\ 000}{1\ 000} + 2 \right) \right] \times 1.695\ 6 \end{aligned}$$

$$= 20.856 \text{ (Nm}^3\text{/s)}$$

1.2 蓄热室热平衡计算

按照通常国内对浮法玻璃熔窑蓄热室温度参数的设计习惯，设定烟气进入格子体温度1450℃，从格子体炉条碓下排出温度600℃，助燃空气进入格子体温度100℃，出格子体能够达到的预热温度1100℃。

①蓄热室内格子体的温度分布和气体热容量（见表1）：

表1 蓄热室格子体的温度分布和气体热容量

项目	温度/℃	气体热容量 /kJ·Nm ⁻³ ·℃ ⁻¹
烟气进格子体温度	t _y =1450	C _y =1.591
烟气出格子体温度	t _y =600	C _y =1.457
空气进格子体温度	t _k =100	C _k =1.323
空气预热温度	t _k =1100	C _k =1.449

②烟气带入蓄热室热量（由原料挥发分随烟气带入的热量按增加2%考虑）：

$$\begin{aligned} Q_{v0} &= 1.02 \cdot YQ \cdot C_{Y_1} \cdot t_{Y_1} \\ &= 1.02 \times 20.856 \times 1.591 \times 1450 \\ &= 49076 \text{ (kJ/s)} \text{ ----- (100\%)} \end{aligned}$$

③每秒助燃空气预热热量：

$$\begin{aligned} Q_{k0} &= KQ (C_{K_2} \cdot t_{K_2} - C_{K_1} \cdot t_{K_1}) \\ &= 19.5 \times (1.449 \times 1100 - 1.323 \times 100) \\ &= 28501 \text{ (kJ/s)} \text{ ----- (58.08\%)} \end{aligned}$$

④烟气排出格子体的温度（格子体热利用系数η=95%）：

$$\begin{aligned} t_{y2s} &= \frac{1}{C_{Y_2}} \left(C_{Y_1} \cdot t_{Y_1} - \frac{Q_{k0}}{YQ \cdot \eta} \right) \\ &= \frac{1}{1.457} \left(1.591 \times 1450 - \frac{28501}{20.856 \times 0.95} \right) \\ &= 596 \text{ (}^\circ\text{C)} \end{aligned}$$

⑤烟气带出热量：

$$\begin{aligned} Q_{vc} &= YQ \cdot C_{Y_2} \cdot t_{Y_2s} \\ &= 20.856 \times 1.457 \times 596 \end{aligned}$$

$$= 18111 \text{ (kJ/s)} \text{ ----- (36.90\%)}$$

⑥蓄热室格子体结构散热（约为每秒烟气带出格子体总热量的5%）：

$$\begin{aligned} Q_{xs} &= Q_{v0} - Q_{k0} - Q_{vc} \\ &= 49076 - 28501 - 18111 \\ &= 2464 \text{ (kJ/s)} \text{ ----- (5.02\%)} \end{aligned}$$

1.3 玻璃熔窑的全窑基本热平衡

①玻璃熔窑的基本热平衡是指熔窑主要的收入热与消耗热之间的热平衡，次要的收入热与消耗热数量很小都不考虑。玻璃熔窑收入热仅来自于燃料燃烧产生的热量，助燃空气带入热属于熔窑系统内自循环热量，不属于收入热。支出热包括：玻璃液形成过程耗热、窑体结构散热、排出烟气带走热。

②燃料的燃烧放热过程仅是在玻璃熔窑的熔化区炉膛内进行的。无论是气体燃料、液体燃料、还是固体粉料，在燃烧温度很高的熔化区炉膛内基本都能完全燃尽、全部热量都释放出来。所以玻璃熔窑的收入热就是所消耗的燃料量与其低发热量的乘积。

③玻璃液形成过程耗热是指熔化区炉膛内玻璃配合料熔化成高温玻璃液吸收的热量；烟气带走热是指蓄热室格子体炉条碓下方烟气所含的热量；窑体结构散热是指熔化区、小炉、蓄热室区域内的散热，这些吸热、散热都要消耗燃料燃烧放出的热。

④澄清区及其之后的窑体结构散热属于高温玻璃液的冷却放热，这是玻璃成形工艺需要的降温引起的放热；整个烟道系统散热属于排出烟气放出的热量，这两项散热都不消耗燃料燃烧放出的热，不是本文讨论的消耗热。

1.4 全窑基本热平衡计算

①全窑每秒消耗燃料产生的热量（收入热）：

$$\begin{aligned} Q_{RL} &= \frac{P \cdot 10^3 \cdot r}{24 \times 3600} \\ &= \frac{1000 \times 1000 \times 5860}{86400} \\ &= 67824 \text{ (kJ/s)} \text{ ----- (100\%)} \end{aligned}$$

②全窑每秒生成玻璃液耗热量：

单位玻璃生成过程耗热量是指配合料在熔制过程中生成1 kg玻璃液理论上需要消耗的热量。

本熔窑取熔化成1 kg玻璃液需要的耗热量： $r_G = 3\ 000\text{kJ/kg}_{\text{玻璃液}}$

$$Q_G = \frac{P \cdot 10^3 \cdot r}{24 \times 3\ 600}$$

$$= \frac{1\ 000 \times 1\ 000 \times 3\ 000}{86\ 400}$$

$$= 34\ 722\ (\text{kJ/s}) \text{-----} (51.19\%)$$

③蓄热室每秒排出烟气带走热量（前面已计算出）：

$$Q_{VC} = 18\ 111\ \text{kJ/s} \text{-----} (26.70\%)$$

④全窑窑体结构散热热量：

$$Q_{SR} = Q_{RL} - Q_G - Q_{VC}$$

$$= 67\ 824 - 34\ 722 - 18\ 111$$

$$= 14\ 991\ (\text{kJ/s}) \text{-----} (22.10\%)$$

1.5 浮法玻璃熔窑的热效率

①全窑每秒生成玻璃液耗热量占全窑每秒燃料燃烧产生热量的百分比即为熔窑的热效率。大型浮法玻璃熔窑的热效率一般在40%~45%。本1 000 t/d浮法玻璃熔窑属于超大吨位，热效率达到了51.19%，显示了单位能耗随熔窑吨位增大而降低的规律。

②此规律的曲线形状是随熔窑吨位增大斜率逐渐变小的下凹形曲线。在400 t/d附近时斜率变化还很明显，在700 t/d时变化已比较缓慢，到1 000 t/d时已经比较平坦了。说明在700 t/d之后单位能耗随熔窑吨位增大而降低的规律已不明显。

2 浮法玻璃熔窑的窑体结构散热分析

2.1 玻璃熔窑的窑体结构散热

①玻璃熔窑的熔化区、小炉、蓄热室三个区域内窑体结构散热，包括：窑壁表面散热、各类孔洞的散热、受到风冷及水冷带走热。不同吨位浮法玻璃熔窑的三个区域的耐火材料总重量大约为全窑耐火材料总重量的80%。为了计算方便，

可以把全窑耐火材料总重量作为计算窑体结构散热量的基数。

②浮法玻璃熔窑总体外形的相似性：不同吨位浮法玻璃熔窑的总体外形具有明显的相似性，并随熔窑吨位大小渐进性的变化。虽各部位的细部尺寸变化不是按固定比例改变，但总体外形结构尺寸是在一定的比例范围之内。

③熔窑各部位构造的一致性：不同吨位浮法玻璃熔窑各部位的窑壁厚度及其构造形式、耐火材料品种及其传热性能、孔洞的大小、保温的强弱、冷却措施、温度制度等都是基本固定的；只是窑体外形平面尺寸大小和孔洞的多少随熔窑吨位的变化有所不同。因此，窑体结构上每个部位的单位面积窑壁散热量应是比较固定或变化不大的。

④窑体结构散热量与耐火材料总重量成比例：熔窑吨位越大，窑体外形平面尺寸就越大（高度方向不变或变化很小），全窑耐火材料的总重量也越大，窑体结构散热量也就成比例地增大。浮法玻璃熔窑各部位窑壁的单位面积（或单位重量）的散热量是基本固定不变的。还可以表述为：浮法玻璃熔窑的窑体结构散热量与其全窑耐火材料的总重量是成比例的。

⑤前面计算得出的本1 000 t/d浮法玻璃熔窑的全窑窑体结构散热量为14 991 kJ/s。这是根据通常浮法玻璃熔窑蓄热室的运行状态，格子体排烟温度600℃，助燃空气预热温度1 100℃情况下的初步计算结果。

⑥这一散热量能否真正体现出1 000 t/d浮法玻璃熔窑的实际运行状态呢？可以通过与国内外运行最多、最具有成熟经验的500 t/d、600 t/d浮法玻璃熔窑的窑体结构散热量情况相比较而得出结论。

2.2 对比500 t/d、600 t/d浮法玻璃熔窑的情况

①国外几家著名玻璃公司设计的，以及国内设计比较先进的500 t/d浮法玻璃熔窑的窑体结构

主要尺寸：熔化部池宽10 300~10 500 mm，熔化部池长33 000~34 000 mm，5~6对小炉，熔化区池长20 000 mm左右。蓄热室格子体高度8 000 mm左右，格子体排烟温度600 ℃，助燃空气预热温度1 100 ℃。500 t/d浮法玻璃熔窑的全窑耐火材料总重量约7 000 t，燃重油时单位能耗6 900 kJ/kg_{玻璃液}。

②600 t/d浮法玻璃熔窑的熔化部池宽10 800~11 000 mm，6对小炉，熔化部和熔化区池长比500 t/d熔窑大约长1 000 mm。蓄热室格子体高度及其排烟温度和助燃空气预热温度都与500 t/d熔窑相同。600 t/d浮法熔窑的全窑耐火材料总重量7 700 t左右，燃重油时单位能耗6700 kJ/kg_{玻璃液}。

③按照前面的计算方法分别对500 t/d、600 t/d熔窑进行热平衡计算，计算结果汇总见表2。

表2 500 t/d、600 t/d浮法玻璃熔窑的能耗分析（燃重油）

熔化能力	500 t/d		600 t/d	
单位能耗/kJ·kg _{玻璃液} ⁻¹	6 900 (1 650 kcal/kg _{玻璃液})		6 700 (1 600 kcal/kg _{玻璃液})	
烟气进格子体温度/℃	1 450		1 450	
烟气出格子体温度/℃	596 (≈600)		596 (≈600)	
空气进格子体温度/℃	100		100	
助燃空气预热温度/℃	1100		1 100	
消耗燃料放热/kJ·s ⁻¹	39 931	100%	46 528	100%
熔化玻璃耗热/kJ·s ⁻¹	17 361	43.48%	20 833	44.78%
排烟带走热量/kJ·s ⁻¹	10 664	26.70%	12 424	26.70%
窑体结构散热/kJ·s ⁻¹	11 906	29.82%	13 271	28.52%
全窑耐火材料总重量/t	≈7 000		≈7 700	

2.3 确定1 000 t/d 浮法玻璃熔窑的窑体结构散热量

①500 t/d浮法玻璃熔窑全窑耐火材料总重约7 000 t，窑体结构单位时间散热量约为11 900 kJ/s。600 t/d浮法熔窑的耐火材料总重量和窑体结构散热量均为500 t/d熔窑的约1.1倍，这是多座500 t/d、600 t/d浮法玻璃熔窑统计的典型数据，

是很成熟的数据。

②本1 000 t/d浮法玻璃熔窑熔化部的窑体结构主要尺寸情况：熔化部池宽12 000 mm，熔化部池长43 000 mm，7对小炉，熔化区池长26 000 mm，熔化率3.2 t/(m²·d)。本1 000 t/d浮法熔窑的全窑耐火材料总重量约10 000 t。

③1 000 t/d浮法熔窑全窑热平衡初步计算得出的窑体结构散热损失为14 991 kJ/s，是500 t/d浮法熔窑11 900 kJ/s的≈1.26倍。两座熔窑的熔化能力（吨位）相差一倍，熔化部面积大约是1.5倍，耐火材料总重量也是大约1.5倍，而两者窑体结构散热量却相差不很大，这是不应出现的情况，反应出本1 000 t/d浮法熔窑热平衡初步计算中有的参数需要修改。

④1 000 t/d浮法熔窑全窑耐火材料总重量约10 000 t，是500t/d浮法熔窑约7 000 t的≈1.43倍。格子体排出烟气温度都是600 ℃，助燃空气预热温度都是1 100 ℃，则1 000 t/d浮法熔窑全窑窑体结构每秒散热量应为：1.43×11 900≈17 000 kJ/s。

⑤可以修改的参数之一是单位能耗指标。提高浮法玻璃熔窑的单位能耗指标，使全窑收入的总热量增加，同时也会引起排烟量增加并引起排烟带走热量有所增加，但能够找到满足窑体结构散热量约17 000kJ/s的单位能耗指标。

⑥还可以修改的参数之二是格子体排烟温度和助燃空气预热温度。通过增加格子体高度来增加格子体换热面积，能提高助燃空气的预热温度，增加蓄热室的热回收率，降低格子体的排烟温度，减少排烟热损失。在单位能耗不增加的情况下，降低格子体的排烟温度，就能使窑体结构散热量得到补偿、达到要求，这是节能减排的措施。

3 1 000 t/d浮法玻璃熔窑不同设计方案的能耗分析

3.1 紧凑型窑体尺寸方案

本1 000 t/d浮法玻璃熔窑给定的窑体尺寸属

于紧凑型，耐火材料总重量10 000 t、设定窑体结构散热量17 000 kJ/s的条件下，按照“提高单位能耗指标”和“降低格子体排烟温度”两种改进措施，分别做出1 000 t/d浮法玻璃熔窑的“方案A”和“方案B”的能耗分析，汇总见表3。

表3 紧凑型1 000 t/d浮法玻璃熔窑不同设计方案的能耗分析（燃重油）

设计方案	1 000 t/d-A		1 000 t/d-B	
改进措施	提高单位能耗指标		降低格子体排烟温度	
单位能耗指标 /kJ·kg _{玻璃液} ⁻¹	6 100 (1 460 kcal/kg _{玻璃液})		5 750 (1 375 kcal/kg _{玻璃液})	
熔化部池宽/mm	12 000		12 000	
熔化部池长/mm	43 000		43 000	
熔化部池深/mm	1 200		1 200	
小炉对数	7		7	
熔化区池长/mm	26 000		26 000	
熔化率/t·m ⁻² ·d ⁻¹	3.2		3.2	
格子体高度/mm	≈8 000		≈9 500	
烟气进格子体温度/℃	1 450		1 450	
烟气出格子体温度/℃	596 (≈600)		493 (≈500)	
空气进格子体温度/℃	100		100	
助燃空气预热温度/℃	1 100		1 200	
燃料燃烧放热/kJ·s ⁻¹	70 602	100%	66 551	100%
生成玻璃耗热/kJ·s ⁻¹	34 722	49.18%	34 722	52.17%
排烟带走热量/kJ·s ⁻¹	18 853	26.70%	14 775	22.20%
窑体结构散热/kJ·s ⁻¹	17 027	24.12%	17 054	25.63%
全窑耐火材料总重量/t	≈10 000		≈10 000	

3.2 扩大窑体尺寸方案

保持排烟温度600 ℃不变，扩大窑体尺寸，耐火材料总重量就要增加，单位能耗指标也要增加。按照“熔化部面积增加10%”和“熔化部面积增加20%”两种改进措施，分别做出1 000 t/d浮法玻璃熔窑的“方案C”和“方案D”的能耗分析，汇总见表4。从国内已建成投产的多座900~

1 000 t/d浮法熔窑来看，基本都是这种大窑体的情况。

表4 扩大窑体尺寸1 000 t/d浮法玻璃熔窑不同设计方案的能耗分析（燃重油）

设计方案	1 000 t/d-C		1 000 t/d-D	
改进措施	熔化部面积增加10%		熔化部面积增加20%	
单位能耗指标 /kJ·kg _{玻璃液} ⁻¹	6 280 (1 500 kcal/kg _{玻璃液})		6 500 (1 550 kcal/kg _{玻璃液})	
熔化部池宽/mm	13 000		13 000	
熔化部池长/mm	44 000		48 000	
熔化部池深/mm	1 200		1 200	
小炉对数	7		8	
熔化区池长/mm	26 000		28 000	
熔化率/t·m ⁻² ·d ⁻¹	2.96		2.75	
格子体高度/mm	≈8 000		≈8 000	
烟气进格子体温度/℃	1 450		1 450	
烟气出格子体温度/℃	596 (≈600)		596 (≈600)	
空气进格子体温度/℃	100		100	
助燃空气预热温度/℃	1 100		1 100	
燃料燃烧放热/kJ·s ⁻¹	72 685	100%	75 231	
生成玻璃耗热/kJ·s ⁻¹	34 722	47.77%	34 722	
排烟带走热量/kJ·s ⁻¹	19 409	26.70%		
窑体结构散热/kJ·s ⁻¹	18 554	25.53%		
全窑耐火材料总重量/t	≈11 000			

4 结语

(1) 浮法玻璃熔窑的能耗由熔化玻璃液耗热、窑体结构散热、排出烟气放热三项内容组成。熔化玻璃液耗热量取决于熔窑吨位和生成每千克玻璃液耗热（原料配方决定）；窑体结构散热量取决于全窑耐火材料重量；排烟放走热量取决于蓄热室炉条渣下排烟温度。对于确定了熔化能力、燃料、原料的浮法玻璃熔窑来说，在确定了窑体尺寸之后，这三项热量消耗都是可以通过

热平衡计算准确得出的。据此，本文提供了一种浮法玻璃熔窑单位能耗指标的计算方法。

(2) 窑体结构散热量与全窑耐火材料的总重量成比例，但不能表述为与熔窑吨位成比例，因为同吨位玻璃熔窑的耐火材料总重量可随不同设计有很大差别。

(3) 增大窑体尺寸，耐火材料总重量和单位能耗指标也随之升高。大体规律是：熔化部面积增加10%，全窑耐火材料总重量要增加10%，则窑体结构散热量也要增加10%，单位能耗指标

大约要增加3%，以此递增。

(4) 炉条碓下的排烟温度决定排出烟气带走热量占燃料燃烧产生热量的百分比，与熔窑吨位大小无关。如燃重油浮法玻璃熔窑的排烟温度596℃时，排烟热损失为26.7%，大小吨位燃重油浮法玻璃熔窑都是如此百分比。

(5) 本文中各种吨位玻璃熔窑蓄热室的格子体均按条形砖计算重量，若采用筒形砖或十字型砖格子体，全窑耐火材料总重量会有变化。

《Low-E节能玻璃应用技术问答》新书推荐

本书以LOW-E玻璃的节能性为线索，以问答的形式介绍了建筑玻璃节能的基本概念、光热性能参数及相关测量标准和计算软件、各种玻璃产品的特性、影响玻璃节能的因素及优化措施等，并针对实用中常见的玻璃隔声、防结雾、外觀光畸变、不同气候区域的节能特点等问题提出了解决建议，为设计出更适用的建筑玻璃提供了指导。本书可供建筑设计师、幕墙设计师、建筑节能技术人员及高校建筑设计专业师生参考，也可作为玻璃行业技术和销售人员的培训教材。

ISBN 978-7-5160-1377-9

本书销售电话：13701136512 戴老师

