

专题论坛

# 关于玻璃池窑炉采用纯氧燃烧技术的认识

贝荣华

(苏州市节能监测站/苏州市节能服务中心 江苏苏州 215003)

**摘要** 本文通过具体的玻璃熔炉, 摸索关于纯氧燃烧玻璃熔炉的定量计算, 帮助我们理解纯氧燃烧技术, 综合节能减排效果的研究, 深化对该技术的认识。

**关键词** 纯氧燃烧 玻璃熔炉 定量计算 节能减排

## 1 关于纯氧燃烧技术的认识

传统燃料能源日益减少, 对环境的危害却又日益突出, 全世界都在关心人类的生存和可持续发展问题。在新替代能源还远不能占主导地位前, 对于传统燃料能源节约使用的研究仍在不断深入。在燃烧技术方面纯氧燃烧、蓄热燃烧等, 正是一股新军。纯氧燃烧技术, 特别是在大型玻璃熔炉上, 正方兴未艾。

据介绍, 纯氧燃烧技术用在大型玻璃熔炉上, 可比常规空气助燃炉窑节能 15%~40%; 废气排放中的氮氧化物 ( $\text{NO}_x$ ) 可降低 75%~90%; 铝硼硅酸盐玻璃配合料粉尘可降低 30%~50%; 大幅降低二氧化硫、二氧化碳排放。而且综合设备投资及生产维护费用相对较低。

于是, 有两个问题摆在我们面前:

第一, 暂避开环保问题。纯氧燃烧, 减少了因为空气中占有五分之四、又不参与燃烧的氮气, 需要把它加热, 又白白携带大量热量随烟气排走。这一部分热量肯定是可以纯氧助燃节约的; 但生产纯氧的空分装置, 又大量耗能。那么合算吗?

第二, 纯氧燃烧中, 氧气和燃气不宜于预热, 那么这部分烟气余热的数量和利用, 又将如何?

本文结合实例, 进行定量地分析和认识。

实例: 某正准备投运的, 年产 4 万吨的玻璃熔解炉, 使用天然气与纯氧燃烧技术。国外设计年耗用天然气  $720 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 、氧气  $1500 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 。

## 2 玻璃熔解炉热平衡计算

要定量地分析纯氧燃烧技术的得益, 仍需从玻

璃熔解炉的热平衡计算开始着手。

### 2.1 玻璃熔解炉工况 (按该炉实例)

- (1) 玻璃生产容量  $4 \times 10^4 \text{ t/d}$ , 即  $4.57 \text{ t/h}$ ;
- (2) 燃用天然气  $720 \text{ Nm}^3/\text{h}$ , 热值  $8900 \text{ kcal/Nm}^3$  ( $37255 \text{ kJ/Nm}^3$ ); 耗用纯氧气  $1500 \text{ Nm}^3/\text{h}$ ;
- (3) 熔池玻璃熔融最高温度  $1400^\circ\text{C}$ , 最高炉温  $1500^\circ\text{C}$ , 熔解炉出口玻璃液温度  $1300^\circ\text{C}$ , 比热  $1.40 \text{ kJ/kgK}$  (按资料), 熔解炉排烟温度  $1300^\circ\text{C}$ ;
- (4) 加入原料平均比热  $0.82 \text{ kJ/kgK}$  (按资料), 环境温度取  $20^\circ\text{C}$ ;

(5) 熔解炉的熔融率 81%, 则原料量 (包括各类矿物无机原料、碎玻璃等) 为  $4.57 \div 81\% = 5.64 \text{ t/h}$

(6) 原料含水 4%, 这部分含水是玻璃熔融所必须的。它可以湿润, 在原料表面形成水膜, 溶解纯碱和芒硝的 5%, 有助于加速融化; 还可以增加原料粘附性, 易于混合均匀, 减少粉料飞扬危害和飞扬损失等。

### 2.2 玻璃熔炉有效热

(1) 熔解炉出口熔融玻璃带出热, 可按熔融玻璃比热计算:  $Q_1 = 4.57 \text{ t/h} \times 1.40 \text{ kJ/kgK} \times (1300 - 20)^\circ\text{C} = 8190 \times 10^3 \text{ kJ/h}$

(2) 炉内反应、熔融热。玻璃熔融是一个复杂过程, 按推荐数据, 反应熔融热可取  $150 \text{ kcal/kg}$  ( $630 \text{ kJ/kg}$ ):  $Q_2 = 630 \text{ kJ/kgK} \times 5.64 \text{ t/h} = 3553 \times 10^3 \text{ kJ/h}$

(3) 原料水分蒸发热, 水蒸汽热焓按  $4500 \text{ kJ/kg}$ :  $Q_3 = 5.64 \times 10^3 \text{ kg/h} \times 4\% \times 4500 \text{ kJ/kg} = 1015 \times 10^3 \text{ kJ/h}$

### 2.3 进入熔炉的热量

(1) 天然气燃烧热, 按发热值计算:  $Q_4 = 720$

$$\text{Nm}^3/\text{h} \times 37255 \text{ kJ}/\text{Nm}^3 = 26824 \times 10^3 \text{ kJ}/\text{h}$$

(2) 加入消泡剂等有机物燃烧热, 按经验数据计算:  $Q_5 = 80 \times 10^3 \text{ kJ}/\text{h}$

(3) 加入原料带入的物理热, 用比热计算:

$$Q_{61} = 5.64 \text{ t}/\text{h} \times 0.82 \text{ kJ}/\text{kgK} \times 20^\circ\text{C} = 93 \times 10^3 \text{ kJ}/\text{h}$$

(4) 天然气带入物理热, 用比热计算 (天然气常温时比热  $2.1 \text{ kJ}/\text{kgK}$ , 密度  $0.71 \text{ kg}/\text{m}^3$ ):  $Q_{62} = 720 \text{ Nm}^3/\text{h} \times 2.1 \text{ kJ}/\text{kgK} \times 0.71 \text{ kg}/\text{m}^3 \times 20^\circ\text{C} = 22 \times 10^3 \text{ kJ}/\text{h}$

(5) 氧气带入物理热 (氧气常温时比热  $0.91 \text{ kJ}/\text{kgK}$ , 密度  $1.42 \text{ kg}/\text{m}^3$ ):  $Q_{63} = 1500 \text{ Nm}^3/\text{h} \times 0.91 \text{ kJ}/\text{kgK} \times 1.42 \text{ kg}/\text{m}^3 \times 20^\circ\text{C} = 39 \times 10^3 \text{ kJ}/\text{h}$

总进入熔炉的物理热  $Q_6 = Q_{61} + Q_{62} + Q_{63} = 154 \times 10^3 \text{ kJ}/\text{h}$

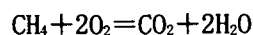
合计, 进入熔炉的热量:

$$Q_0 = Q_4 + Q_5 + Q_6 = 27058 \times 10^3 \text{ kJ}/\text{h}$$

#### 2.4 烟气带出热

烟气带出热由两部分组成: 天然气纯氧燃烧, 产生烟气带出的物理热; 玻璃物料熔融反应排出气体带出的物理热组成:

(1) 天然气纯氧燃烧烟气带出热计算 (天然气纯氧燃烧采取简化计算, 按主要成分是甲烷的燃烧。



耗氧量应是天然气量的两倍, 可见设计的耗氧量基本上是正确的。

燃烧产生的烟气由  $\text{CO}_2$  和  $2\text{H}_2\text{O}$  组成:  $\text{H}_2\text{O}$  分子量 18,  $1300^\circ\text{C}$  平均比热  $2.7 \text{ kJ}/\text{kgK}$ ;  $\text{CO}_2$  分子量 44,  $1300^\circ\text{C}$  平均比热  $1.34 \text{ kJ}/\text{kgK}$ 。

简化为理想气体计算, 标准状态气体单位摩尔的体积数是相等的, 均为  $22.4 \text{ L}/\text{mol}$ 。

则燃烧烟气重度为:  $(44 + 2 \times 18) / (3 \times 22.4) = 1.19 \text{ kg}/\text{Nm}^3$

燃烧烟气平均比热为:  $(44 \times 1.34 \text{ kJ}/\text{kgK} + 2 \times 18 \times 2.7 \text{ kJ}/\text{kgK}) / (44 + 2 \times 18) = 1.95 \text{ kJ}/\text{kgK}$

烟气量为:  $720 \text{ Nm}^3/\text{h} \times 3 \times 1.19 \text{ kg}/\text{Nm}^3 = 2570 \text{ kg}/\text{h}$

烟气带出热量 (排烟  $1300^\circ\text{C}$ ):  $Q_{71} = 2570 \text{ kg}/\text{h} \times 1.95 \text{ kJ}/\text{kgK} \times 1300^\circ\text{C} = 6515 \times 10^3 \text{ kJ}/\text{h}$

(2) 反应排出气体的带出热量。玻璃熔炉熔融率 81%, 加入物料除熔融为玻璃外, 其余基本上全部以气体形式排出, 气体以  $\text{CO}_2$ 、 $\text{SO}_2$ 、 $\text{N}_2$  等为主。该部分带出热量为 (按平均比热  $1.3 \text{ kJ}/\text{kgK}$ ):

$$Q_{72} = (5.64 \text{ t}/\text{h} - 4.57 \text{ t}/\text{h}) \times 1.3 \text{ kJ}/\text{kgK} \times 1300^\circ\text{C} = 1808 \times 10^3 \text{ kJ}/\text{h}$$

(3) 废气总带出热量 (考虑燃烧过剩空气系数、携带粉尘等因素, 乘 1.1 系数)

$$Q_7 = (Q_{71} + Q_{72}) \times 1.1 = 9155 \times 10^3 \text{ kJ}/\text{h}$$

#### 2.5 各项散热损失的热量

大概由如下三部分组成: 计有炉壁散热量 (包括炉壁风冷的带出热量); 炉子各构件的冷却水带出热量; 炉内热烟气泄露和辐射带出的热量等。三项大概各占三分之一。在缺少数据的情况下, 暂以反平衡计算:

$$Q_8 = Q_0 - Q_1 - Q_2 - Q_3 - Q_7 = 5145 \times 10^3 \text{ kJ}/\text{h}$$

#### 2.6 计算得该玻璃熔解炉的热效率

$$\eta = (Q_1 + Q_2 + Q_3) / Q_0 = 47.2\%$$

以上计算, “各项散热损失” 项因缺乏数据难于计算, 但总体看, 计算结果吻合于有关参考资料和介绍。因此认为可作为下述定量分析的依据。

### 3 与空气燃烧相比的综合节能量

单从玻璃熔炉能耗角度看, 纯氧燃烧与空气燃烧的差别, 主要就是炉窑用纯氧助燃燃烧, 减少了用空气助燃燃烧时, 空气中占五分之四、又不参与燃烧的氮气体量。既无须把它加热, 又避免它携带大量热量随烟气而排走。因此, 玻璃熔炉采用纯氧燃烧的节约燃料量, 就在燃烧排烟损失这一项的减少上。但是, 纯氧的制取又需花费不小的能量, 综合考虑还合算吗? 需要核算。

#### 3.1 空气助燃燃烧计算

(1) 为方便对比, 仍然采用纯氧燃烧时的简化计算方法。

空气中氧氮之比约为 21: 79, 简化为 1: 4

燃烧反应是  $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 + 8\text{N}_2 = \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 8\text{N}_2$

燃烧产物  $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{N}_2$  体积比为 1: 2: 8

平均重度:  $(44 + 2 \times 18 + 8 \times 28) / (11 \times 22.4) = 1.23 \text{ kg}/\text{Nm}^3$

平均比热 ( $\text{N}_2$  分子量 28,  $1300^\circ\text{C}$  平均比热  $1.26 \text{ kJ}/\text{kgK}$ ):  $(44 \times 1.34 \text{ kJ}/\text{kgK} + 2 \times 18 \times 2.7 \text{ kJ}/\text{kgK} + 8 \times 28 \times 1.26 \text{ kJ}/\text{kgK}) / (44 + 2 \times 18 + 8 \times 28) = 1.44 \text{ kJ}/\text{kgK}$

空气助燃燃烧时, 产生的烟气量为:  $720 \text{ Nm}^3/\text{h} \times 11 \times 1.23 \text{ kg}/\text{Nm}^3 = 9742 \text{ kg}/\text{h}$

那么, 烟气带出热量为 (排烟  $1300^\circ\text{C}$ ):  $9742 \text{ kg}/\text{h} \times 1.44 \text{ kJ}/\text{kgK} \times 1300^\circ\text{C} = 18237 \times 10^3 \text{ kJ}/\text{h}$

(2) 同样考虑燃烧过剩空气系数、携带粉尘等因素, 乘 1.1 系数。则空气助燃燃烧比纯氧助燃燃烧烟气多带出热量:  $(18237 \times 10^3 - 6515 \times$

$$10^3) \text{kJ/h} \times 1.1 = 12894 \times 10^3 \text{ kJ/h}$$

因此, 就可以计算得到: 对比纯氧燃烧时耗用的燃料量, 使用纯氧助燃燃烧比空气助燃燃烧的燃料节约燃料量为:  $12894 \times 10^3 \text{ kJ/h} / (Q_0 + 12894 \times 10^3 \text{ kJ/h}) = 32.27\%$

可以估算, 如果用空气助燃燃烧, 该炉子的热效率是:  $47.15\% / (100\% + 32.27\%) = 35.65\%$

### 3.2 纯氧燃烧总综合能耗的计算

使用纯氧燃烧的总得益是: 纯氧燃烧比空气燃烧减少了排烟损失而节约的燃料量、可以减少空气助燃送风机的电耗量和空分装置可以回收氮气的等价能量; 但需扣除制氧机多耗的电能能量。

以下逐项分析计算:

(1) 据上计算纯氧燃烧可节约燃料量 32.27%, 折节约标煤:  $E_1 = 12894 \times 10^3 \text{ kJ/h} / 29300 \text{ kJ/kg} = 440 \text{ kgce/h}$

(2) 按我国目前较先进空分装置, 电耗  $0.60 \text{ kWh/Nm}^3 \text{ O}_2$ , 制氧耗电:  $1500 \text{ Nm}^3/\text{h} \times 0.60 \text{ kWh/Nm}^3 \text{ O}_2 = 900 \text{ kWh}$

耗电折标煤:  $E_2 = 900 \text{ kWh} \times 0.36 \text{ kgce/kWh} = 324 \text{ kgce/h}$

(3) 减少熔炉常规空气鼓风机用电: 用空气量  $1500 \text{ Nm}^3/\text{h} \times 100/21 = 7143 \text{ m}^3/\text{h}$ , 需用功率为  $10 \text{ kW}$  的鼓风机, 相当于耗标煤:  $E_3 = 10 \text{ kW} \times 0.36 = 3.6 \text{ kgce/h}$

可见按目前我国空分装置水平看, 使用纯氧燃烧:  $E_1 + E_3 - E_2 = 119.6 \text{ kgce/h}$

可见以上三项的能耗得失基本持平。因此总得益主要在于取得氮气和大幅减少  $\text{NO}_x$  的排放 (目前我国大多地区还未收  $\text{NO}_x$  的排放费)。

### 3.3 计算结论

玻璃熔炉采用纯氧助燃燃烧能耗的得益  $\approx$  因减少排烟损失而节约的燃料量 + 节约空气助燃送风机的电耗量 - 制氧机多耗的电能能量  $\approx$  空分装置回收氮气的等价能量

空分装置, 按国家标准等价能量的折标系数为:  $\text{O}_2 \quad 0.4 \text{ kgce/Nm}^3$ ;  $\text{N}_2 \quad 0.671 \text{ kgce/Nm}^3$

制氧机生产氧氮的体积比按 1: 1 计算, 制氧机能耗为  $600 \text{ kWh}$ , 相当于  $216 \text{ kgce/h}$ , 则产生的氮气等价能量为:  $216 \text{ kgce/h} \times 0.671 / (0.671 + 0.4) = 135 \text{ kgce/h}$

$$135 \text{ kgce/h} \times 29300 \text{ kJ/kgce} = 3955 \times 10^3 \text{ kJ/h}$$

与该玻璃熔炉耗用的燃料能相比占能耗:  $3955 \times 10^3 \text{ kJ/h} / 26820 \times 10^3 \text{ kJ/h} = 14.75\%$

可见, 采用纯氧燃烧技术, 在目前我国空分装置水平下, 在本例中对于玻璃熔炉来说, 是节约了其燃料 (天然气) 耗量的 32.27%; 但为了取得纯氧, 它部分被空分装置增加的能耗所抵消, 综合节能量应该是节约了相当于该玻璃熔炉的燃料量的 14.75%。这部分得益, 也正好相当于取得的氮气的等价能量量, 也就是得益在于氮气的回收利用上。

当然不言而喻, 大幅减少  $\text{NO}_x$  的排放, 对于环保的得益是极有利的。

因此需要重视氮气的综合利用; 但随着空分装置水平的提高, 以及国外已在膜技术、分子筛、沸石等直接分离技术方面的突破, 纯氧燃烧技术的经济效益、综合节能价值和对于环保的贡献必将更为突现。

## 4 余热锅炉回收烟气余热等的分析

烟气带走了大量能量。空气助燃燃烧, 排出的烟气多, 那么它回收的余地也会多些。这时纯氧燃烧与空气燃烧相比, 又会是如何呢?

本例, 纯氧助燃玻璃熔解炉废气带出热量为  $9158 \times 10^3 \text{ kJ/h}$ , 考虑脱硫装置等因素, 可利用温度为  $1200 \sim 300^\circ\text{C}$ , 近似可利用热量:

$$9158 \times 10^3 \text{ kJ/h} \times (1200 - 300)^\circ\text{C} / 1200^\circ\text{C} = 6866 \times 10^3 \text{ kJ/h}$$

考虑余热锅炉其它损失 15%, 可产生蒸汽:  $0.5 \sim 1.0 \text{ MPa}$ ,  $250^\circ\text{C}$ ,  $2930 \text{ kJ/kg}$

$$6866 \times 10^3 \text{ kJ/h} \times 85\% \div 2930 = 2.0 \text{ t/h}$$

当然, 空气助燃燃烧, 排出的烟气热量多, 利用空气预热装置和余热锅炉回收的热量也会多些。它可多回收热量与纯氧燃烧相比:

$$18237 \times 10^3 \text{ kJ/h} / 9158 \times 10^3 \text{ kJ/h} = 2.0 \text{ 倍}$$

如果全用来产生蒸汽, 可得:  $2.0 \times 2.0 \text{ t/h} = 4.0 \text{ t/h}$

显见, 这些热量的回收, 比起两个庞大的空气预热器——蓄热室 (不是蓄热式燃烧) 的投资和维修、增大了的熔炉炉膛设计等, 则未必合算。

作为使用天然气为燃料的玻璃生产线, 蒸汽的使用也是很有限的, 回收与不回收, 都令人尴尬。可见从工程、从运行、从维修、从环保等全面看, 使用纯氧燃烧, 是非常合理的, 它成为当代炉窑节能技术的前沿, 当之无愧。

玻璃熔炉及其生产线, 因为高温和后续澄清、锡槽、退火等等的需要, 很多散热是工艺必须的。这些散热在玻璃生产线上数量非常大, 对其进行回

# 采取措施实现冷库运行的节能

孙书静

(辽宁省辽中县水利化工设备厂 辽宁辽中 110200)

**摘要** 从合理开机、提高蒸发温度、避免冷凝温度升高、热氨融霜、库门维护和定期放油等几个方面,来分析冷库日常运行中的节能措施。

**关键词** 冷库运行 节能措施 管理水平

在化工、食品等行业的生产中,冷库的耗电量颇大。因此,冷库能否节电,是行业能否节能降耗、降低成本、提高效益的关键之一。鉴于冷库从业人员节能意识薄弱,对日常的操作、维修和保养管理的不善,使能源浪费十分严重。就此问题论述冷库日常运行的节能措施。

## 1 合理开机,降低压缩机电耗

压缩机是冷库最主要的用电设备。在冷库设计中,一般根据全年出现的最大机械负荷工况确定配机,以满足热负荷高峰期要求。然而在实际运行中,由于存在着食品冷加工与贮藏的淡旺季变化,全年昼夜气温的变化和其他的变化因素,往往设计时所选配的压缩机满负荷运行时间较短,低负荷运行时间长,因此压缩机大部份运行时间处于小于设计负荷工况下运行,节能潜力大。目前多数冷库仍然采用人工操作调整开机,盲目开机现象普遍存在。如何提高压缩机运行的经济性与合理性,研究结果表明,应遵循如下原则:

(1) 正确估计冷库实际耗冷量的变化。掌握食品加工过程的放热量,外界气温、冷却水温变化、日常操作热量等耗冷量的变化规律,做好日常管理记录,随时调整压缩机的开机台数,使开机压缩机的产冷量适应或接近冷库实际耗冷量。

(2) 保证满足制冷负荷的前提下,尽可能减少开机台数,提高压缩机运行效率。选择开1台制冷量大的压缩机代替2台制冷量小的压缩机;选择开单机双级机代替两台配组式双级机;选择开配组式双级机代替两个蒸发温度系统的降温。

(3) 调整开机时间。在不影响食品冷藏质量的前提下,减少白天制冷压缩机的运行时间(最好中午时段开机),增加夜间制冷压缩机的运行时间,即选择用电低谷(即在深夜后开机);不但降低费用,而且夜间冷凝温度较低,可降低压缩机电耗。

## 2 合理调节蒸发温度

在制取相同冷量时,提高蒸发温度能使压缩机的功率消耗减少。因为当冷凝温度不变时,提高蒸发温度,压缩机的吸入压力也相应升高,吸入蒸汽的比容减少,单位容积制冷量增加,以及压缩比减少,输汽系数提高,制取相同冷量时耗能就减少。例如对于压缩机,当蒸发温度每升高 $1^{\circ}\text{C}$ ,每千瓦时的产冷量将提高2.4%左右,节能效果显著。日常操作时,应根据不同冷藏食品品种、质量和不同贮藏期的要求来确定相应合理的贮藏温度。适当提高蒸发温度,不但能缩小传热温差,减少食品干耗,提高产品质量,且可提高压缩机单位轴功率制冷量。避免冷凝温度升高现象发生。

收应该是可以的,如果改变观念,把散热和余热看作是一种资源,这里的节能潜力也非常可观。

## 5 结束语

玻璃熔炉使用纯氧燃烧技术,是个新的事物,对于它,我们感性和理性方面都理解甚少。本文试图通过具体的玻璃熔炉,摸索关于纯氧燃烧玻璃熔

炉的定量计算,帮助我们理解纯氧燃烧,综合节能减排效果的研究,深化对该技术定性、定量和全面的认识。

当然,计算中不得不进行了一定的简化,而对照有关参考资料和介绍,误差还是能在可控制的范围之内。对于指导当前工作,理清思路,仍感到颇有意义。