

# 玻璃熔窑天然气燃烧及底烧、侧烧方式之特点分析

Feature analysis among Natural gas combustion for the Glass furnace,  
under port and side port

陈 鑫

南玻集团吴江公司 江苏吴江 215222

**摘 要** 本文介绍了玻璃窑炉天然气燃烧的特性，两种燃烧方式：底烧和侧烧方式的特点比较。甲烷在天然气中占90%以上的比例，其燃烧特性使天然气火焰具有燃烧速度慢，火焰较长，黑度较低等特点。侧烧方式，相比底烧具有：混合充分、甲烷裂解高效、燃烧充分、压低火焰、火焰空间压低、利于控制气氛等特点，综合认为，侧烧较底烧具有较高的热效率。

**Abstract** This article mainly introduces the feature for natural gas combustion for the glass furnace, and also compares the way of under port combustion with side port combustion. The methane, with its proportion of over 90% of the natural gas, makes its flame burn slowly with long flame and little darkness. Compared with under port combustion, side port combustion is inclined to have the following features: fully mixed, methane effectively cracked, fully combusted, lower flame, lower combustion space, which makes better to control the atmosphere, so the conclusion is that the way of side port combustion possesses better heat efficiency.

**关键词** 天然气 燃烧特性 甲烷裂解 底烧 侧烧 热效率

**Key words** natural gas combustion feature methane cracking under port combustion side port combustion heat efficiency

## 1 前言

随着国内能源工业的发展，天然气作为一种清洁能源，已经越来越多的被各厂采用作为玻璃熔窑的燃料。据初步统计，2000年国内只有约5座浮法窑炉烧天然气，2009年达到近30座窑炉，其他压延线、器皿窑则更多，尤其是近两年，改烧天然气的生产线呈快速增加趋势。

现在熔窑燃天然气的方式主要有两种，底烧和侧烧。本文主要探讨天然气的燃烧特性，两种燃烧方式的特点比较。

## 2 天然气成分特征及燃烧机理

天然气是一种混合气体，组成随气田、气层不同而异，但都以甲烷（ $\text{CH}_4$ ）为主要成分，含量一般在90%以上，最多可达98%， $\text{C}_2\text{H}_6$ （乙烷）以上的烃类较少，还含有少量 $\text{H}_2\text{S}$ 、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{N}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$ 及He、Ar等，密度为0.5~0.7 $\text{kg}/\text{Nm}^3$ ，热值较高，一般能达到8000~9000 $\times 4.184\text{kJ}/\text{Nm}^3$ ；在重油、焦炉煤气、发生炉煤气、石油焦粉、煤焦粉等熔窑燃料中，是仅次于重油的高热值燃料。

甲烷是无色气体，密度0.715 $\text{kg}/\text{Nm}^3$ ，难溶于水，临界温度-82.5 $^\circ\text{C}$ ，低位热值35800 $\text{kJ}/\text{Nm}^3$ ，着火温度为530~750 $^\circ\text{C}$ 。表1为几种单一可燃气体的燃烧特性。

表1 几种单一可燃气体的燃烧特性

气体名称	分子量	密度 Kg/Nm <sub>3</sub>	着火温度 (°C)	最大燃烧 速度 (Nm/s)	最大燃烧 速度时一 次空气系数	爆炸上下 极限20°C空 气中体积(%)	低热值 (kJ/Nm <sub>3</sub> )
甲 烷	16.043	0.715	530-750	0.38	0.90	15.0 / 5.0	35883
氢 气	2.016	0.0899	510-590	2.8	0.57	75.9 / 4.0	10761
一氧化碳	28.010	1.250	610-658	0.51	0.46	74.2 / 12.5	12636

### 3 天然气燃烧及传热效率的分析

天然气是通过管道引进窑内，一般都不经过预热而以常温直接喷入窑内燃烧；更主要由于甲烷的燃烧特性，因此天然气火焰具有燃烧速度慢、火焰长、刚性差、火焰黑度低等特点，尤其是燃烧速度慢。

玻璃熔窑内最主要的传热方式，是辐射传热。烟气黑度是影响火焰燃烧辐射传热过程的重要参数。烟气黑度越大，则辐射能力越强，辐射换热量越多。玻璃熔窑采取有焰扩散式方式燃烧，产生发光火焰，此时影响烟气黑度主要是碳黑。

碳黑是碳氢化合物热分解产生的小微粒，直径约在0.01~0.05 μm之间，呈颗粒状、链状或絮状分布在气体中。碳氢化合物在高温分解过程中发生碳氢化合物的脱氢和碳原子的聚集过程，最后产生大量的固体碳粒；甲烷虽然在低温（800°C以下）便开始分解，但开始速度很慢，温度越高，分解越快，[2] 相关经验认为在1130-1180°C之间能达到较好的裂解效果。这些碳粒燃烧时呈现明亮的火焰，这是碳氢化合物扩散燃烧时的一个特征，增碳燃烧提高传热效果就是利用这一机理。碳黑燃烧是一种两相燃烧，所需时间较长，如果燃烧不完全就会被燃烧产物带走，形成碳烟。在扩散火焰中的碳粒，一旦接触氧气便立刻燃烧。

天然气和空气边混合边燃烧，燃烧速度主要决定于天然气和助燃空气的混合速度。从以上分析，提高天然气燃烧的热效率，主要从提高甲烷裂解速度，改善天然气和助燃风的混合条件，这两方面来改进燃烧效率。[3]

### 4 烧方式的特点分析

现在主要有两种燃烧方式：底烧和侧烧。两种燃烧方式的小炉结构示意图如下图。

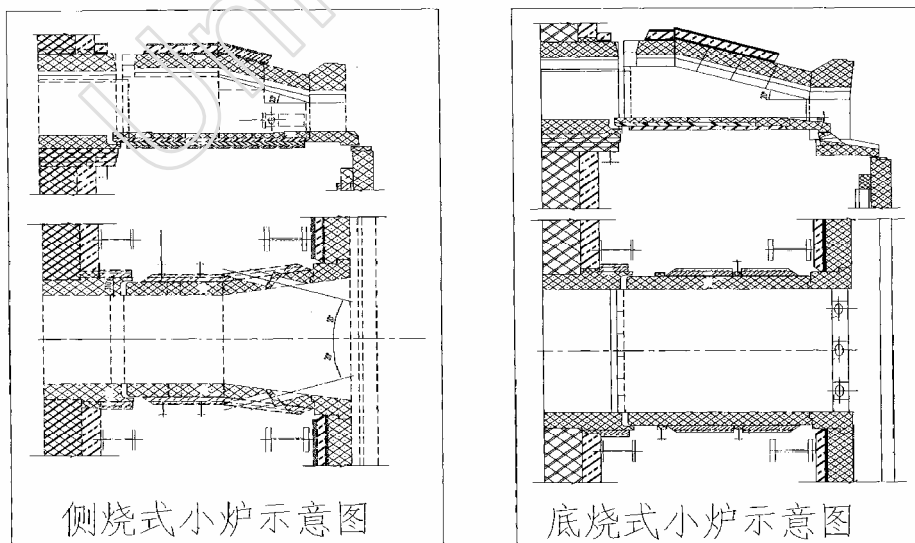


图1 两种燃烧方式的小炉结构示意图如下图

以底烧方式为基础，与底烧方式进行比较，从理论上，分析侧烧方式的特点如下：

4.1 侧烧方式，天然气喷出与助燃空气交汇时，在小炉内部较狭小的空间，而且从助燃风的中部射出，正好喷射在助燃空气的流股之中，相当于助燃风包火的方式，有效改善了与助燃空气的混合效率，提高了燃烧速度，使燃烧更充分，燃烧效率更高。而底烧方式，天然气喷出时在大窑内，在窑内较大的空间内，混合速度较慢。

4.2 侧烧式小炉结构，相比底烧结构，喷枪位置较胸墙后移了800mm左右，使天然气在小炉内形成一定的预热条件，温度的提高改善了甲烷裂解的速度，达到较好的自增碳效果；进入大窑内即是较明亮的火焰，拉近火焰高黑度区域，辐射能力强，提高了传热效果。

4.3 侧烧方式，把温度较低的火根区域缩在小炉内，相当于延伸了火焰燃烧空间距离。相对火焰较长的特点，促进了天然气在窑内较充分的燃烧，降低了烟气离开大窑时的温度，减少了烟气带走的热量。

4.4 底烧小炉下倾角一般在 $20^{\circ}$ ，喷枪具有一定的上倾角 $5-6^{\circ}$ ，火焰能达到比较贴近玻璃液面的效果。虽然侧烧喷枪高度较底烧大约高150mm左右，但侧烧小炉口具有较高的下倾角 $23-25^{\circ}$ 而且喷枪角度基本调成 $0^{\circ}$ ，在一定动能的助燃风推动下，进入窑内也能够达到较好的，火焰贴近玻璃液面的效果。

4.5 侧烧方式，具有较底烧更低更优化的火焰空间。气体的温度、气层的有效厚度和气体的风压增大时，气体的辐射能力也相应增加。另一点，火焰空间越高，火焰随着动能的减弱而使火梢容易发飘。侧烧式小炉结构，其火焰空间高度较低，其胸墙高度较底烧方式压低近500mm，相应大碓高度压低，有效提高了碓顶对热量的反射，提高传热效率。（同时侧烧方式，在窑体耐材用量方面稍节省，投资也相应有所节省。）

4.6 两种燃烧方式对窑内气氛的影响：底烧方式，天然气处在助燃空气和玻璃液面之间，相对在玻璃液面位置，由于较多的天然气阻隔，加之天然气本身具有较强的还原性，使液面层形成较强的还原气氛。而玻璃液面的气氛性质，对玻璃液的熔化质量和玻璃颜色都有较大的影响，一般会使玻璃颜色偏蓝。底烧方式，为了达到一定的气氛要求，就要相应采取较高的助燃空气过剩系数，相应则使烟气量增加，能耗损失增加。侧烧方式，天然气处在助燃风的流股之中，玻璃液面上方相应稍强的氧化气氛，相对有利于控制玻璃液颜色，而且有利于提高玻璃熔化质量。相比较，侧烧方式，在气氛控制及颜色调节上，要有优势。

4.7 侧烧方式只能采用天然气或焦炉煤气做燃料，对重油等燃料不能适应。而底烧方式，适应各种燃料，比较方便进行各种燃料的切换（仅需更换喷枪及管路，小炉结构基本不用改变）。这一点，对于能源资源日益紧张的今天，底烧方式由于其燃料适应性，显得比较重要。

4.8 侧烧方式，每对小炉安装两支喷枪，燃料量大，火焰体积大，喷嘴调节不方便，还有火焰相互冲击干扰的情况。而底烧一般安装3支燃烧器，易于调节火焰长度和控制较高的火焰覆盖面。在近两年的窑炉设计上，侧烧小炉口做到2.4m宽，较之2000年左右的2.0m宽，能有效避免两只枪火焰冲击干扰的情况，而且在火焰覆盖面上并不比底烧方式低。

## 5 侧烧底烧实例之能耗数据对比

相比燃重油熔窑，同一种底烧方式，一般认为燃天然气熔窑，单位能耗增加5%左右；这已成为行业内比较一致的观点，国内较多厂改造，从原先的重油底烧改成天然气底烧，其能耗数据，也基本验证了这种差异。

如国内近几年有较多600t/d左右规模的熔窑在生产，有天然气底烧式，能耗大多约在 $1600 \times 4.184 \text{kJ/kg}$ 玻璃液；有采用重油底烧式，能耗约 $\leq 1500 \times 4.184 \text{kJ/kg}$ 玻璃液。

侧烧方式的实例：青岛某横火焰玻璃窑，采用顶插式油枪和侧烧式燃气两种燃料方式，曾单独使用燃油时能耗 $1500 \times 4.184 \text{kJ/kg}$ 玻璃液，后改烧天然气，全部燃气时能耗 $1550 \times 4.184 \text{kJ/kg}$ 玻璃液；相比燃油和燃气，能耗相差约3.2%；从这里，我们大致判断，侧烧方式相比底烧方式，大约节

能效率在5%-3.2% =1.8%左右。

综合以上分析，我们认为：针对燃气窑炉，侧烧方式较底烧方式，燃烧效率较高，传热效果更好。从过往各线的使用情况，我们判断，侧烧方式相对能耗效率约在2%左右。当然，熔窑的能耗，与窑炉规模、窑炉结构、窑炉炉龄、产品档次、原料质量等很多因素有关系，很难就燃烧方式直接对比能耗水平。本文主要是从燃烧理论为基础分析，希望能做到一种定性的判断。随着越来越多的燃天然气窑炉投产，相应两种燃烧方式的特点和效率分析，也将进一步丰富和更加准确。

#### 参考文献

- [1] R.R 赖敬 燃烧技术手册 [M] 1982北京：石油工业出版社
- [2] 马晓茜 天然气燃烧特性及其与其它燃气的互换性分析 [J]，冶金能源，2001. (5)
- [3] 同济大学，等，燃气燃烧与应用 [M] 1981北京：中国建筑工业出版社

#### 作者简介

陈鑫 (Chenxin)，1971年09月出生，男，籍贯安徽蚌埠，工程师，1996年加入南玻集团，熔化工程师，主要技术方向熔窑建设施工及生产工艺控制，燃烧及节能工艺的改进。南玻集团，CSG HOLDING CO.,LTD.

E-mail:chenx@csgholding.com