

文章编号: 1000-2278(2011)03-0395-08

## 基于火焰稳定特性浸没燃烧器的设计与试验研究

宫小龙<sup>1,2</sup> 刘中良<sup>1</sup> 江瀚<sup>1</sup> 李清方<sup>3</sup>

(1. 北京工业大学传热强化与过程节能教育部重点实验室及北京市传热与能源利用重点实验室, 北京 100124;  
2. 景德镇陶瓷学院材料工程学院, 江西 景德镇 333403; 3. 中国石化胜利油田胜利工程设计咨询有限责任公司,  
山东 东营 257026)

### 摘 要

采用传统设计方法对浸没燃烧技术中的燃烧器进行设计,在实际应用过程中总出现回火、脱火、燃烧不稳定问题,本文根据火焰稳定特性知识构建了天然气火焰稳定性图,提供了一种对于燃烧气体燃料浸没燃烧器燃烧室的设计思路,并对该思路下设计的浸没燃烧器燃烧室进行了具体设计,融入旋流稳焰原理,一次空气与燃料旋流预混,二次空气冷却燃烧室外壁并被预热然后在燃烧室头部进入燃烧室助燃,进行了浸没燃烧器的总体设计,并对设计的燃烧器在自行设计的增压浸没燃烧试验台进行了初步试验研究,试验侧重燃烧稳定性与污染物排放。结果表明该浸没燃烧器燃烧稳定性相对较好,且由于良好的结构设计,节能减排效果显著。

关键词 稳定特性,浸没燃烧器,设计,试验研究

中图分类号: TQ174.6\*5 文献标识码: A

## 1 引 言

浸没燃烧蒸发(SCE)技术是一种无固定传热面的蒸发方式,因此浸没燃烧蒸发器是一种高效的蒸发设备<sup>[1,2]</sup>。具体表现在高温烟气与待蒸发液体直接接触而发生传热传质,与间壁式换热器相比,具有传热速率快、热利用率高和结构简单等优点,因而避免了结晶、结垢等阻碍传热因素的影响,同时由于气液交互、扰动剧烈、尾气温度低,其热效率高达95%以上<sup>[1]</sup>,按燃料低热值计算其热效率可超过100%,被广泛应用于高粘性、高沸点或强腐蚀性溶液的蒸发,尤其适合于易结垢液体的蒸发浓缩、分离,在冶炼、化工、核工业和环保等领域有着广泛的应用。

增压浸没燃烧(The Pressurized Submerged Combustion Evaporation, PSCE)是本课题组老师率先提出的,它是基于常规浸没燃烧的二次开发与利用。随着可持续发展战略的实施,对环境保护、节约能源

和原材料的要求日益迫切,工艺和控制技术不断进步,浸没燃烧技术应用领域不断拓展,为能获得相对较高温度与压力的排气,发展出增压浸没燃烧。通过增大蒸发器液面上的总压力,提高液体的沸点值,增大输出混合气体的温度和压力。增压浸没燃烧热效率更高,有着特殊的用途。例如增压浸没燃烧技术用于油田污水汽化生产和油田生产加热介质时,燃料的高位发热量和烟气的余热得到完全利用,所以按传统的燃料低位发热量定义的热效率实际上可以大于1。烟气在高温区停留时间短,在燃烧室中生成后立即进入液体被冷却,从而减少NO<sub>x</sub>等污染物的生成。超高压浸没燃烧将燃烧产生的烟气连同油田污水汽化的蒸汽一同注入地下,用于稠油热采。燃烧产物的主要成分是N<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub>、高温饱和水蒸汽。在石油开采中,N<sub>2</sub>对原油具有弹性驱动作用,CO<sub>2</sub>对原油具有溶解作用,水蒸汽对原油具有热力作用。因此该方式不仅对采油效率有积极作用,而且能真正实现增压浸没燃烧系统的“零排放”,节省大量的水资源。能实现油田污

收稿日期: 2010-11-29

基金项目 教育部高等学校博士学科点专项科研基金项目(编号: 20040005003); 北京市拔尖创新人才选拔计划项目(编号: 2006); 北京工业大学第8届研究生科技基金资助项目(编号: ykj-2010-3590)

通讯联系人: 刘中良, E-mail: liuzl@bjut.edu.cn

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

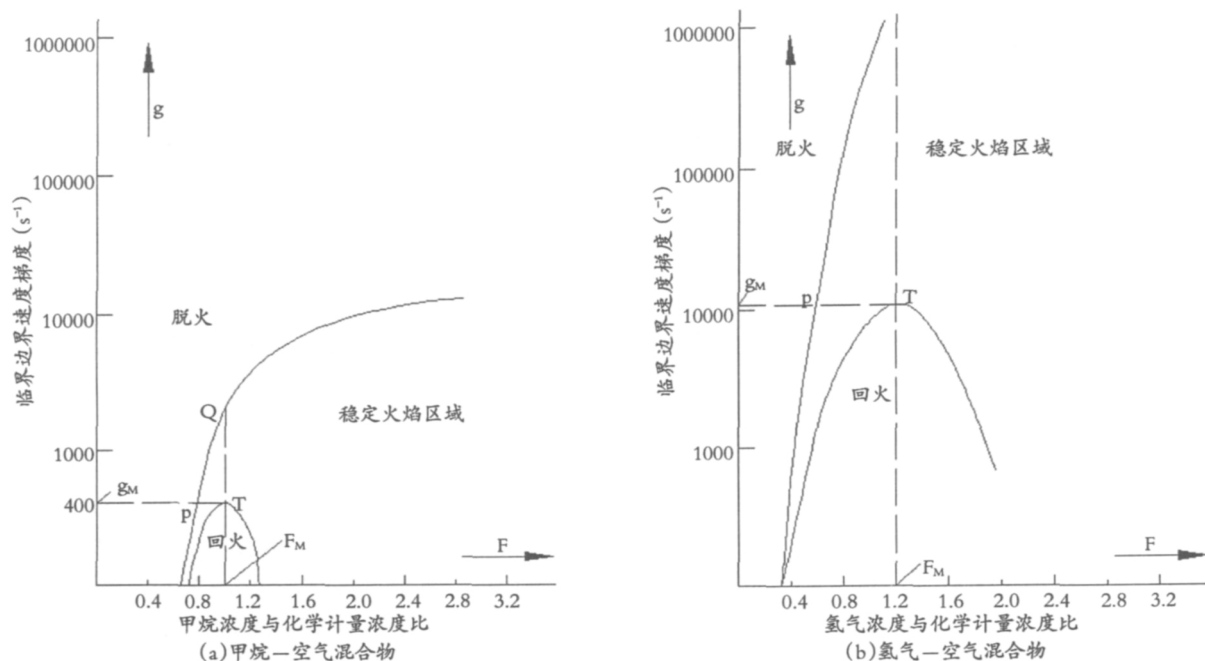


图 1 临界边界速度梯度与燃料浓度的关系

Fig.1 Relationship between critical boundary velocity gradient and fuel concentration

水的高效、无污染、资源化利用,实现油田生产的节水、节能、减排,大幅度降低油田生产成本。

然而,无论是浸没燃烧还是增压浸没燃烧,燃烧的稳定条件是设计浸没燃烧器的关键问题<sup>[3,5]</sup>。浸没燃烧器的燃烧条件与一般燃烧不同,有它一定的特殊性。首先由于燃烧器底部的鼓泡管必须插入液体中,所以燃烧室内的压力较一般情况要高,增压浸没燃烧燃烧室压力会更高,而且在鼓泡管鼓泡时由于液面波动要引起燃烧室压力波动<sup>[4]</sup>。这种压力波动会引起燃烧不稳定,严重时会使燃烧不完全、熄火、爆鸣,甚至发生爆炸事故。我国从上个世纪 50 年代开始着手研究浸没燃烧,1963 年刘燕龄对浸没燃烧蒸发器的设计做了系统的概述<sup>[6]</sup>,总结提出了浸没燃烧蒸发器的设计思路与方法,1980 南京工学院殷开泰、汪忠<sup>[7]</sup>着重分析了浸没燃烧的稳定性和发生爆鸣的原因,提出了减少压力波动的设计原则和防止爆炸的安全措施,对推广浸没燃烧技术起到积极作用。但是浸没燃烧器的设计均从传统燃烧器设计思路演化而来,在实际使用中问题较多。本文研究增压浸没燃烧,燃烧条件更为苛刻,所以综合国内外相关研究<sup>[8]</sup>,进行了基于火焰稳定特性的增压浸没燃烧器的基础设计,是解决增压浸没燃烧器燃烧稳定性的有效途径。

本文基于火焰稳定特性知识构建了天然气火焰稳定性图,提供了一种对于燃烧气体燃料浸没燃烧燃烧器燃烧室的设计思路,并对该思路下设计的浸没燃烧器燃烧室进行了具体设计,融入火焰稳定原理,一次空气与燃料旋流预混,进行了浸没燃烧器的总体设计,并对设计的燃烧器在自行设计的增压浸没燃烧试验台进行了初步试验研究。

## 2 浸没燃烧器的设计

### 2.1 构建天然气燃烧稳定性图表

纯燃料气体的火焰稳定图表诸如 氢气、甲烷、丙烷等等是可以获得的<sup>[9,10]</sup>。如果燃料气为多组分气体的混合物,例如 LPG 或 NG,如果其中各组分气体的火焰稳定性图表已知的话,就可以构建出混合气体的火焰稳定图表。Van Krevelen 和 Chermin 利用通用火焰稳定图表提供了一套详细构建混合气体组分火焰稳定图表的程序<sup>[9]</sup>。

通用火焰稳定图表理论 - Van Krevelen 和 Chermin 的通用火焰的稳定性的图表是依据相关的定理发展的,该定理是指对于任何燃气混合物或者纯燃气在空气中燃烧的火焰稳定图表完全可以由以下特

征描述。

- (1) 回火曲线的峰值坐标 ( $F_M, g_M$ ) ;
- (2)  $\varphi$  值, 提供了回火曲线宽度的量度 ;
- (3) 从回火曲线的峰值到脱火曲线的距离, 用 TP 和 TQ 表示 (图 1) 。

因此, 如果纯燃气的  $g_M, F_M$  和  $\varphi$  值已知的话, 就能够描绘出它的回火与脱火曲线。对于碳氢气体混合物例如天然气(不计算惰性气体  $N_2$  和  $CO_2$ , 也不计算  $H_2$  和  $CO$ ), 这些气体的影响, 可以通过单独计算对  $g_M, F_M$  和  $\varphi$  进行修正<sup>[8]</sup>, 因此:

$$g_M^0 = \sum x_i g_{Mi} \quad (1)$$

$$F_M^0 = \sum x_i F_{Mi} \quad (2)$$

$$\varphi_0 = \sum x_i \varphi_i \quad (3)$$

氢气火焰稳定性图表 (图 1b) - 对于纯燃气在空气中燃烧的火焰稳定图表已经获得了。Von Krevelen 和 Chermin 提供了各种燃气的  $g_M, F_M$  和  $\varphi$  值数据表。对于氢气这些值是:  $g_M=10500s^{-1}$ ,  $F_M=1.2$ ,  $\varphi=0.46$ 。

设计浸没燃烧器所用天然气成分见表 1, 天然气气体组成以燃气公司提供的检测报告为准。天然气中的碳氢燃气组成以及相应  $F_M, g_M$  和  $\varphi$  值、相应的理论空气需要量和火焰稳定性数据见表 2。其中包括  $C_2H_{10}$ 、 $C_3H_6$  和  $C_3H_8$  等单一组分燃料燃烧的火焰稳定性数据。对于丁烯, 这些值是通过比较 Wohl et al 提供的纯丁烷火焰稳定性图表和 Van Krevelen 以及 Chermin 提出的通用火焰稳定性图表计算得出的。 $C_4H_{10}$  和  $C_5H_{10}$  以及  $C_3H_{12}$  的  $g_M, F_M$  和  $\varphi$  可以假设认为与  $C_4H_8$  值相同。综上所述, 天然气的  $g_M, F_M$  和  $\varphi$  值可由下式计算:

$$g_M^0 = \sum x_i g_{Mi} = 411s^{-1}$$

$$F_M^0 = \sum x_i F_{Mi} = 1.01$$

$$\varphi_0 = \sum x_i \varphi_i = 0.988$$

考虑惰性气体的影响 诸如  $N_2$  和  $CO_2$  对临界边界速度梯度的影响主要来自 Van Krevelend 的实验<sup>[10]</sup>。发现惰性气体体积分数达到 50%, 回火时的最大边界

速度梯度能被计算, 用下面公式做最初的近似:

$$g_M = g_M^0 (1 - A_X) \quad (4)$$

式中,  $x$  是惰性气体的体积分数。

相对气体浓度在最大值时能被计算, 从下面一类似的关系作最初的近似:

$$F_M = F_M^0 (1 - B_X) \quad (5)$$

$A, B$  是常数, 对于二元混合气体其值列在文献表中, 对于一个多组分混合气体 (包含  $N_2, CO$ ), 上面公式变为:

$$g_M = g_M^0 (1 - A_{N_2} x_{N_2} - A_{CO_2} x_{CO_2}) \quad (6)$$

$$F_M = F_M^0 (1 - B_{N_2} x_{N_2} - B_{CO_2} x_{CO_2}) \quad (7)$$

公式 (6) 是一个近似,  $F_M$  恒大于 1, 如果计算中出现  $F_M < 1$ , 实际应按  $F_M = 1$  处理。 $x_{N_2}$ 、 $x_{CO_2}$  为混合气体中  $N_2$  和  $CO_2$  的体积分数,  $A_{N_2}$ 、 $A_{CO_2}$ 、 $B_{N_2}$ 、 $B_{CO_2}$  可参考文献方法算得:  $A_{N_2}=0.836$ ,  $A_{CO_2}=1.494$ ,  $B_{N_2}=0.0052$ ,  $B_{CO_2}=0.0052$ 。

因此, 对于考虑惰性气体的影响, 该天然气的  $F_M, g_M$  和  $\varphi$  值分别为:

$$F_M = F_M^0 (1 - B_{N_2} x_{N_2} - B_{CO_2} x_{CO_2}) = 1.01$$

$$g_M = g_M^0 (1 - A_{N_2} x_{N_2} - A_{CO_2} x_{CO_2}) = 401s^{-1}$$

$$\varphi = 0.988$$

经过构建天然气稳定性图表的计算, 在计算过程中考虑了惰性气体的影响, 计算结果表明天然气  $F_M, g_M$  和  $\varphi$  值基本与单一气体  $CH_4$  的  $F_M, g_M$  以及  $\varphi$  值接近相等, 这是因为天然气中  $CH_4$  体积分数相对较高的缘故, 所以在后面计算燃烧室直径与长度时, 天然气临界边界速度梯度值用甲烷代替, 误差很小。

## 2.2 浸没燃烧器燃烧室的设计

每小时蒸发水量  $32.064kg/h$ , 燃烧器设计负荷 (功率)  $30.0kW$ , 燃料为 CNG, 具体成分见表 1, 经过燃烧基本计算得:

$$\text{每小时燃料消耗量为 } V_f = 2.90 \text{ Nm}^3/h$$

浸没燃烧空气消耗系数一般取 1.1~1.4 为宜, 本论文为增压浸没燃烧, 空气消耗系数取 1.2, 故每小时空气需要量为:

$$V_a = 34.05 \text{ Nm}^3/h \text{ 理论燃烧温度 } T_f = 1653.8^\circ C$$

设计思路图见图 2。

燃烧室直径的计算:

根据火焰稳定的基本原理, 回火或脱火的临界条

表 1 试验天然气成分

Tab.1 Composition of natural gas in the experiment

| 天然气           | CH <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> | C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> | C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> | CO <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> | H <sub>2</sub> S |
|---------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------------|----------------|------------------|
| 体积 %          | 93.36           | 3.72                          | 0.69                          | 0.24                           | 0.08                           | 1.26            | 0.65           | 0                |
| 体积 (不计惰性气体) % | 95.26           | 3.80                          | 0.70                          | 忽略                             | 忽略                             | 0               | 0              | 0                |

表 2 天然气碳氢气体组成以及相应 F<sub>M</sub>,g<sub>M</sub> 和 φ 值表

Tab.2 Hydrocarbon components of natural gas and their corresponding values of F<sub>M</sub>,g<sub>M</sub> and φ

| 气体组成                           | 体积百分比 (%) | 理论空气需要量 (m <sup>3</sup> /m) | g <sub>M</sub> (s <sup>-1</sup> ) | F <sub>M</sub> | φ    |
|--------------------------------|-----------|-----------------------------|-----------------------------------|----------------|------|
| CH <sub>4</sub>                | 93.36     | 8.891                       | 400                               | 1.0            | 1.0  |
| C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>  | 3.72      | 0.620                       | 650                               | 1.13           | 0.8  |
| C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>  | 0         | 0                           | 800                               | 1.14           | 0.68 |
| C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>  | 0.69      | 0.164                       | 580                               | 1.12           | 0.60 |
| C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>  | 0         | 0                           | 580                               | 1.18           | 0.65 |
| C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> | 0.24      | 0.074                       | 580                               | 1.18           | 0.65 |
| C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> | 0.08      | 0.027                       | 580                               | 1.18           | 0.65 |
| 总计                             | 98.09     | 9.78                        |                                   |                |      |

件应该和管口边缘区域中的边界速度梯度相联系,而边界速度梯度控制着燃料气和助燃空气的混合速度,边界速度梯度是燃烧室直径的函数。对于一个给定的边界速度梯度值,混合气体的速度能被表达成燃烧室直径的函数,对于工业规模烧嘴,流速一定會在湍流范围内。在燃烧室直径计算中,选择临界边界速度梯度取决于混合室(对于预混燃烧)和燃烧室的几何形状。可是,实际上发现大多数火焰几乎不脱火,一旦发生就是回火。这显示脱火的临界边界速度梯度是无限地增长。这或许归因于燃烧室被加热到一个非常高温度的实际,这时(回火发生)火焰在燃烧室稳定,因此助燃空气和燃料混合气也被加热到高温。因为燃烧速度与助燃空气和燃料混合气的绝对温度的平方成正比,燃烧室内火焰的稳定性也极大地增加。因此,在环境温度下,基于回火曲线或脱火曲线的燃烧室设计是一个燃烧室的全面设计。

没有数据可以获得来显示在燃烧室中助燃空气和燃料混合气温度增加程度。修正系数不包括对燃烧室直径 D<sub>c</sub> 的设计,这设计是基于脱火曲线在标态(或环境)温度得到的。因此下面方程(8)可以被考虑作为燃烧室直径的设计方程,g 代表脱火(室温)临界边界

速度梯度。

$$g_B=0.0354\frac{V^{1.8}}{D_c^{3.8}}(\frac{\rho}{\mu})^{0.8} \text{ 或}$$
$$D_c=(\frac{0.0354}{g_B})^{0.263}(\frac{\rho}{\mu})^{0.21}V^{0.474} \tag{8}$$

对于一个燃烧器,在燃烧之前燃料气体和助燃空气被预混,需要注意的是火焰不会在气流高速通过喷管情况下发生回火。因此混合气体的速度或流速应该设计成使其边界速度梯度在回火曲线的上方,设计时如果是小喷口进气考虑临界压比问题<sup>[7]</sup>。

利用公式(8),代入已知参数 ρ、μ、g<sub>B</sub> 和热负荷可以得到燃烧器直径 D<sub>c</sub>。

通过计算 D<sub>c</sub>=8.25cm。  
空气过剩系数 n=1.0,F=1 时,g<sub>B</sub>=2×10<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>;  
空气过剩系数 n=1.2,F=0.833 时,g<sub>B</sub>=1×10<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>。

燃烧室长度的计算：

燃烧室空间直径是浸没燃烧器设计中最重要参数,并能够直接影响燃烧器的热负荷。燃烧室空间的长度与燃烧器热负荷几乎无关,主要是受燃烧器的直径影响。因此,燃烧室长度与热负荷是隐函数的关系。下面阐述的燃烧器长度的计算适用于扩散火焰。



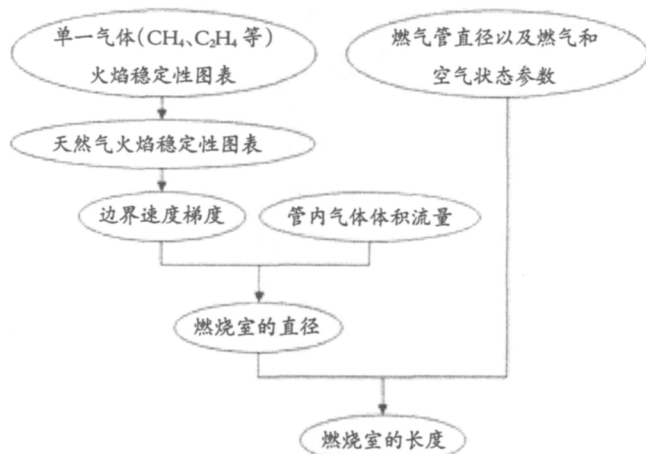


图 2 浸没燃烧器燃烧室设计思路流程图

Fig.2 Design process of the combustion chamber for a submerged burner

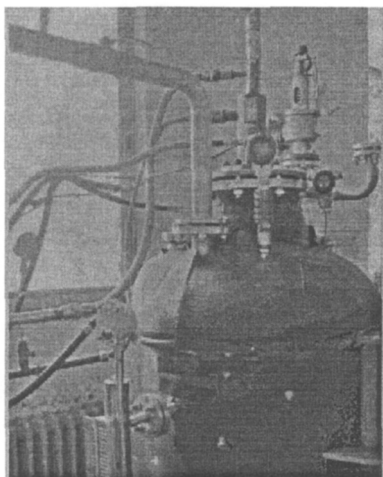


图 4 增压浸没燃烧试验台主体图

Fig.4 Main test facility for pressurized submerged combustion

对于同心射流火焰,利用 Lisienko 方程我们能够得到比较满意的火焰长度计算结果。决定火焰长度的最佳参数有燃气喷口直径  $D_0$ , 燃气与空气的流速比  $\lambda$ 、燃烧空间直径  $D_c$  和空燃比  $C_T$ 。Lisienko 方程如下:

自由射流火焰长度:

$$L_f^{FJ} = 5D_0 \left( \frac{1}{C_T} + 1.5 \right) \sqrt{\frac{T_f}{T_a} \frac{W_g}{W_a}} \quad (9)$$

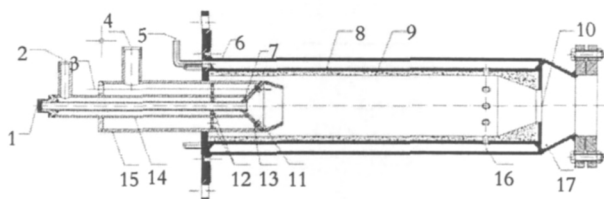
其中,  $T_a$  为空气温度,单位为  $^{\circ}\text{C}$ ;

$W_g$  为燃气摩尔质量;

$W_a$  为空气摩尔质量。

计算得  $L_f^{FJ} = 61.09\text{cm}$

受限射流(浸没燃烧)火焰长度:



备注:1、火焰监测通道;2、燃料气进口;3、点火器;4、一次空气进口;5、二次风进口;6、燃烧室保护外套;7、燃料气喷口;8、燃烧室外壁;9、耐火材料;10、烟气排气孔;11、稳焰器;12、同心定位板;13、空气喷口;14、燃料气管;15、一次配风管;16、二次空气辅助进口;17、膨胀室

图 3 设计浸没燃烧燃烧器简图

Fig.3 Design sketch of the submerged combustion burner

$$L_f^{FJ} = \frac{C_1 D_0}{\left[ 1 + \frac{C_2 D_0^2}{[D_c^2 - (D_0 + 2\delta)^2]^{1/2}} \right]} \quad (10)$$

其中  $C_1 = \frac{L_f^{FJ}}{D_0}$  和  $C_2 = \left( \frac{M_a}{M_g} \right)^2 \frac{W_g}{W_a}$

$M_a$  为空气的质量流量,单位为  $\text{kg/h}$ ;

$M_g$  为燃气的质量流量,单位为  $\text{kg/h}$ 。

计算得:  $L_f^{FJ} = 59.87\text{cm}$ 。

### 2.3 浸没燃烧整体设计

经过燃烧室直径与长度的有效计算,取燃烧室直径为  $9.0\text{cm}$  以及燃烧长度为  $60.0\text{cm}$ ,该浸没燃烧器整体设计如图 3,燃料与一次空气采用旋流小孔喷入燃烧室,可增强火焰稳定特性,二次空气首先通过燃烧室外部环形空腔被燃烧室传递热量预热,起到对燃烧室冷却作用,同时被预热的二次空气在燃烧室头部进入燃烧室助燃,提高了助燃风的温度,从而会适当提高燃烧温度,增强火焰强度,起到节能的作用。该浸没燃烧器的设计课题组已成功申报了实用新型专利<sup>[11]</sup>。

为验证该浸没燃烧器设计的燃烧特性与污染物排放特性,通过课题组自行搭建的增压浸没燃烧试验台对其进行了基础试验研究。

## 3 试验研究

我们将本文所设计的浸没燃烧器放在课题组增

表 3 不同浸没深度下在稳定蒸发阶段所测烟气中 NO<sub>x</sub> 和 CO 浓度

Tab.3 NO<sub>x</sub> and CO contents in the flue gas tested during the steady evaporation for different submerged depths

| 浸没深度<br>(mm) | 燃气流量<br>(m <sup>3</sup> /h) | NO <sub>x</sub> 浓度<br>(ppm) | CO 浓度<br>(ppm) |
|--------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------|
| 50           | 1.25                        | 12.13                       | 0              |
| 100          | 1.26                        | 11.89                       | 0              |
| 200          | 1.25                        | 12.06                       | 0              |
| 300          | 1.25                        | 11.96                       | 0              |

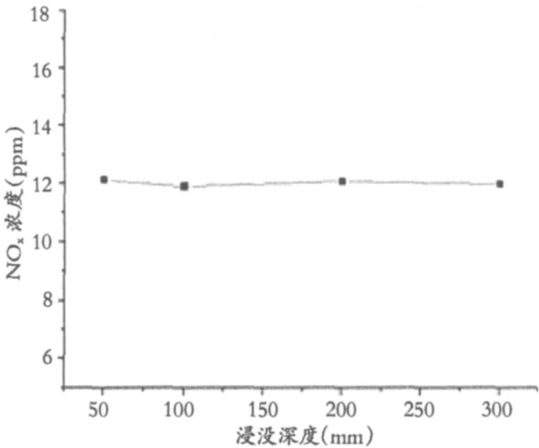


图 5 NO<sub>x</sub> 浓度与浸没深度的关系

Fig.5 Relationship between NO<sub>x</sub> content and submerged depth

表 4 不空气消耗系数下稳定蒸发阶段所测烟气中 NO<sub>x</sub> 和 CO 浓度

Tab.4 NO<sub>x</sub> and CO contents in the flue gas tested during the steady evaporation for different air consumption coefficients

| 空气消耗<br>系数 | 燃气流量<br>(m <sup>3</sup> /h) | NO <sub>x</sub> 浓度<br>(ppm) | CO 浓度<br>(%) |
|------------|-----------------------------|-----------------------------|--------------|
| 0.872      | 1.25                        | 9.18                        | 5.56         |
| 1.257      | 1.26                        | 11.89                       | 0            |
| 1.327      | 1.25                        | 12.06                       | 0            |
| 1.582      | 1.25                        | 20.16                       | 0            |

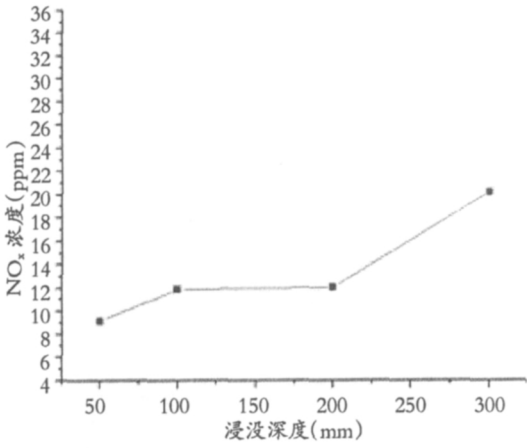


图 6 NO<sub>x</sub> 浓度与空气消耗系数的关系

Fig.6 Relationship between NO<sub>x</sub> content and air consumption coefficient

压浸没燃烧试验台进行基本测试。图 4 为增压浸没燃烧试验台主体图。

设备关键组件 在试验达到稳定蒸发阶段,对排气管路的排气进行了测试,采样点为管路中心位置,仪器为AVL Dicom 4000 烟气分析仪,在线监测。助燃空气通过无锡阿特拉斯·科普柯 (Atlas Copco) 压缩机的GA30C 型空压机,天然气气瓶组通过天津益思达二级减压设备供给,天然气流量通过 AVZ 系列 V 锥流量传感器测量,空气流量通过 AVS100 型涡街传感器测量,液位显示控制通过防爆型 UHZ5600B 磁翻板流量计,设备中还有一些压力、温度以及用于控制的电磁阀、电动调节阀等组件。由于增压浸没燃烧,考虑试验的安全在设备主体上部同时装备了防爆膜和防爆阀。主要采集信号通过西门子 200PLC 采集到上位机输出显示,用于控制与调节。

常压浸没燃烧燃烧器点火均在液面以上点火,火焰调节到理想状态后,再将燃烧器缓慢插入到液面中的适当位置。本次试验浸没燃烧器直接固定在增压浸没燃烧试验台,液面调至微浸鼓泡管,避免点火后高温烟气短路,损坏压力、温度传感器等试验器材。

试验伊始点火存在一些困难,当燃料与一次助燃空气调节在比较好的配比范围,能成功点火,整个试验过程燃烧比较稳定。

浸没燃烧、增压浸没燃烧节能是显著的,前面已经论述,本浸没燃烧器燃烧试验侧重污染物排放试验。

表 3 为不同浸没深度下在稳定蒸发阶段所测烟气中 NO<sub>x</sub> 的浓度,空气消耗系数基本控制在 1.3 左右,其值稳定在 12ppm 附近。而此时烟气中的 CO 浓度均为 0。从图 5 可以看出,NO<sub>x</sub> 的浓度不随浸没深度的变化而变化,或者说变化幅度很小。从稳定的

$\text{NO}_x$  ppm 值可以看出,本文设计使用的浸没燃烧器确实属于低污染燃烧器。

从表 4 及图 6 可以看到  $\text{NO}_x$  ppm 值与 CO 百分比浓度与空气消耗系数的关系。 $\text{NO}_x$  ppm 值随空气消耗系数的增加略有增加,空气消耗系数比较大时, $\text{NO}_x$  ppm 增幅也比较大,这是因为空气消耗系数比较大时,燃料燃烧完全理论燃烧温度偏高,且氧浓度比较大,有利于热力型  $\text{NO}_x$  的生成,而 CO 在空气消耗系数小于 1 时,具有一定的百分比浓度,当空气消耗系数大于 1,燃料燃烧完全时,未检测到有 CO。

## 4 结 论

经过构建天然气稳定性图表,计算过程中考虑了惰性气体的影响,计算结果表明天然气的值基本与单一气体  $\text{CH}_4$  的理论值接近相等,这是因为天然气中  $\text{CH}_4$  体积分数相对较高的缘故,所以在设计计算甲烷为主的天然气燃料增压浸没燃烧燃烧室时,天然气临界边界速度梯度值用甲烷代替,误差很小。同时,气体燃料中甲烷含量相对较低,气体中含有  $\text{H}_2$  以及 CO 的影响亦可考虑其中,设计思路同文中论述一致。外部环境在环境温度下,基于回火曲线或脱火曲线的燃烧室设计是一个增压浸没燃烧燃烧室的全面设计。对于增压浸没燃烧器,在燃烧之前燃料气体和助燃空气被预混,火焰不会在气流高速通过喷管情况下发生回火,因此混合气体的速度或流速应该设计成使其边界速度梯度在回火曲线的上方。理论上而言,增压浸没燃烧确实是一种“零排放”的高效燃烧技术,从污染物排放实验看, $\text{NO}_x$  排放相对较低,燃烧组织的好,

CO 排放为零,而这些污染较小的排放远期目标可以连同高压蒸汽一起输入地下用于稠油开采。

## 参 考 文 献

- 1 丁惠华,杨友麒.浸没燃烧蒸发器.北京:中国工业出版社,1963
- 2 WILLIAMS R, WALKER R. Efficient heat transfer by submerged combustion. *Gas Engineering & Management*, 1997, 37(7): 32~33
- 3 YOON H K, SONG K S, LEE S N. Development of a high load submerged combustion burner. *International Journal of Fluid Mechanics Research*, 1998, 25(1~3)
- 4 LINCK M, GUPTA A K, YU K. Submerged combustion and two-phase exhaust jet instabilities. *Journal of Propulsion and Power*, 2009, 25(2)
- 5 ANNUSHKIN Y M, SVERDLOV E D. Stability of submerged diffusion flames in subsonic and underexpanded supersonic gas-fuel streams. *Fizika Goreniya i Vzryva*, 1977, 5: 53~63
- 6 刘燕龄.浸没燃烧蒸发器的设计.化学世界,1963,(8):381~383
- 7 殷开泰,汪 忠.浸没燃烧蒸发装置的研制和运行经验总结.南京工学院学报,1980,(2):69~79
- 8 Rao P M, Sunavala P D. Burner design for concentration of black liquor by submerged combustion technique. *Indian Journal of Technology*, 1982, 20: 50~55
- 9 LEWIS B, VON ELBE G. *Combustion Flames and Explosion of Gases*. 2nd ed. New York: Academic Press, 1961
- 10 VON KREVELEN D W, CHERMIN H A G. *Seventh Symposium (International) on Combustion*. Combustion Institute. London: Baltimore Scientific Publications, 1959: 358~368
- 11 刘中良,宫小龙.一种高效、节能环保型高压燃烧器.实用新型,200920218975.6

# Design and Experimental Study of Submerged Combustion Burner Based on Flame Stabilization

GONG Xiaolong<sup>1,2</sup> LIU Zhongliang<sup>1</sup> JIANG Han<sup>1</sup> LI Qingfang<sup>3</sup>

(1. The Key Lab of Enhanced Heat Transfer and Energy Conservation of Ministry of Education & the Key Lab of Heat Transfer and Energy Utilization of Beijing City, Beijing University of Technology, Beijing 100124 China; 2. School of Material Science and Engineering, Jingdezhen Ceramic Institute, Jingdezhen Jiangxi 333403; 3. Sinopec Shengli Engineering & Consulting Co., Ltd., Dongying Shandong 257026, China)

## Abstract

Burners based on submerged combustion devised in the traditional way had the problems of backfire, blow-off and unstabilized combustion in practical application. In this paper, a scheme for stabilizing the flame of natural gas was conceived, a series of theories behind the design of the combustion chamber for a submerged gas burner were put forward and an option of the chamber was devised. The proposed design of the combustion chamber employed the technique of flame stabilization based on swirling air flow. The primary air was swirl-premixed with gas fuel, and the secondary air cooled the outside wall of the combustion chamber and finally entered the chamber as combustion air after preheating. The overall design of the submerged combustion burner was also presented. A devised model was mounted onto a self-developed pressurized submerged combustion experiment rig for preliminary tests of burning stability and pollutants' emission. Results showed the model had good stability and yielded remarkable results of energy conservation and emission reduction.

**Key words** stability; submerged burner; design; experimental study