

扁平射流煤粉燃烧室不结焦性能研究

Investigation of the Properties of Coking Proof in the Flat
Jet Combustor Fired Pulverized Coal

中国科学院力学研究所 卫景彬 黎 军 王宏宇

内 容 提 要

扁平射流燃烧是我国新近发展的一种燃烧技术。本文研究了扁平射流燃烧室的流场结构、两相流动中颗粒浓度分布及燃烧条件下温度分布。研究表明,扁平射流燃烧室除具有较强火焰稳定能力外,还具有优良的防止结焦性能。文章重点从气流结构角度指出,流场及燃烧的三区分布是其不结焦性能的主要原因。

Abstract

The flat jet combustion invented by institute of mechanics, Academia sinica, is a new type of jet combustion technology. In this paper, The velocity distribution, Density distribution, And temperature distribution are presented in the combustor. It is not only of strong flame stability and combustion intensity but also in the position to prevent coking in the flat jet combustor. And particularly here pointed out by flowfield structure, three-zone simple model of flow and combustion is a main reason of coking proof in the combustor.

一、扁平射流煤粉燃烧室简介

扁平射流煤粉燃烧室的结构如图1所示^[1]。

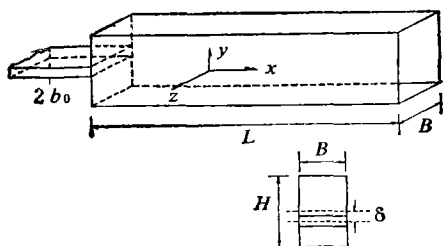


图1 扁平射流(风铲式)燃烧室

该种燃烧室一般为矩形通道,燃烧室内尺寸可以取:

$$L = nH \quad (n \text{ 为已知参数})$$

$$H \leq B$$

其中 L —— 燃烧室长度, H —— 燃烧室高度,
 B —— 燃烧室宽度。

燃烧室进口为扁平形状,进口宽度与燃烧室宽度 B 相同,其高度 $(2b_0)$ 可以取:

$$2b_0 = \frac{1}{m}H \quad (m \text{ 为已知参数})$$

如文献[2]所述,由于扁平射流燃烧室内流场达到了自模化状态($Re_c > 10^5$),因此,燃烧室进口速度 u_{in} 取值范围可以较宽。如实验及工业应用证明的,当 $u_{in} = 14\text{m/s} \sim 45\text{m/s}$ 变化时,燃烧室内沿轴向各 x 截面上无量纲速度分布,即 $\frac{u}{u_{in}} \left(\frac{y}{y_0} \right)$ 相同,其中 y 为沿燃烧室高度方向坐标, y_0 为燃烧室半高度,即 $y_0 = \frac{1}{2}H$ 。

二、燃烧室内流场结构

应用 55X 双色二维激光测速仪(LDV)对扁平射流燃烧室内空气动力场进行了实验研究。

图2给出了扁平射流燃烧室内典型速度分布。除两侧近壁处外,燃烧室内呈二维流动,因此图2给出的为宽度方向对称面上二维速度场测量结果。

由图2可以看出,由于扁平射流附壁效应,射流从喷口进入燃烧室后立即偏转折向壁面。约在 $x = 1.0H$ 处,射流已紧紧地靠近壁

面。直到 $x=3.5H$ 处，射流又向上向燃烧室中心折回流动。射流向下偏转，在射流、端壁、底壁与两侧壁间形成了一个小的回流区域；而在燃烧室中上部形成了一个大的回流区域。小回流区的长度约为 $(0.5\sim 1.0)H$ ；而大回流区几乎占据了从 $x=0$ 到燃烧室出口较大的空间。小回流区内回流速度较大，压力 P_2 较低；大回流区内回流速度较小，压力 P_1 较高。压差 $\Delta P=P_1-P_2$ 使得扁平射流稳定地附于下壁流动。

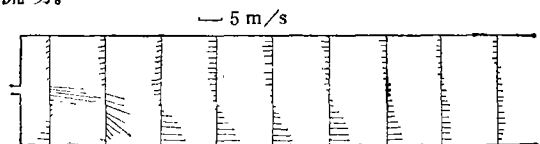


图2 燃烧室内速度分布

这两个回流区可以稳定火焰。对不同种类燃料两个回流区作用不同。对于气相燃料来说，由于其化学反应速度高，着火提前，小回流区直接卷吸高温烟气，因而可以稳定火焰；对于煤粉等固体燃料来说，其化学反应速率相对于气相燃料来说慢得多，着火向后推迟，小回流区难以卷吸到高温烟气，因而稳定煤粉火焰主要依靠大回流区来完成。

对图2典型流场进行分析，可以得到图3所示的“四段”、“三区”简化模型。

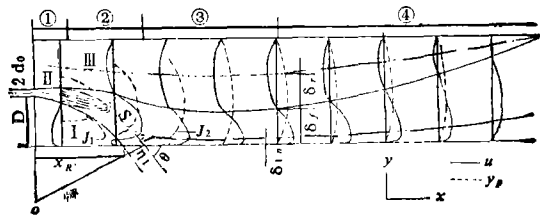


图3 简化三区流动模型

沿轴向，正向流可以分为四段：

1. 自由射流段。刚出喷口的扁平射流为一股二维平面自由射流；
2. 弯曲射流段。二维平面射流离开扁平喷口不久，向下弯曲呈弧状流动；
3. 附壁射流段。射流弯曲达到附壁点之后，附着于壁面向前流动；
4. 射流扩展段。附壁射流在向前流动的同

时向上扩展，直至正向流充满燃烧室空间。

与此同时，更重要的，在3和4段沿燃烧室高度方向上，又可以把燃烧室内的流动划分为三个区域，即：

I区——高速正流底层区。它从燃烧室下壁面直到正流的主流线，该区流层薄，流速高，特别是在“3”段沿 y 向I区内轴向流速，除极薄的边界层外，几乎为常数。高速底层区的存在是扁平射流燃烧室所特有的气流结构。

II区——变速正流中层区。它的范围为正向流的主流线到正向流与逆向流交界的零速度线处。该区流层较厚，流速变化较大。正流与逆向流之间各种湍流交换剧烈。

III区——上部反向逆流区。它从燃烧室内零速度线直到燃烧室上壁面处。该区为逆向流动，它类似于一个逆向射流点源流动，其逆向流动速度剖面近似沿逆向主流线对称扩展。

三区速度分布大致可以给出如下形式的表达式。

I区近似为1/15次方定律：

$$\frac{u}{u_{m,r}} = \left(\frac{y}{\delta_{in}} \right)^{1/15} \quad (1)$$

式中 $u_{m,r}$ ——正流主流线上速度；

δ_{in} ——I区流层高度。

II区近似为3/2次方定律：

$$\frac{u}{u_{m,r}} = \left[1 - \left(\frac{y - \delta_{in}}{\xi} \right)^{3/2} \right]^2 \quad (2)$$

式中 ξ ——中间参量；

$$\xi = 2.3\delta_{0.5}$$

$\delta_{0.5}$ ——表示 $u=0.5u_{m,r}$ 时的 y 值。

III区速度分布近似为：

$$\frac{u}{u_{m,r}} = \left[1 - \left(\frac{y - y_f}{H - y_f} \right)^{3/2} \right]^2 \quad (3)$$

式中 $u_{m,r}$ ——逆向主流线上速度；

$$y_f = \delta_f + \delta_r;$$

δ_f ——I区和II区正流层高度和；

δ_r ——III区逆流层之半高度。

三、燃烧室中两相流颗粒浓度分布

燃烧室内气固两相流实验中给出的 $x-y$

剖面内颗粒浓度分布结果见图4。实验中进口风速 $u_{in}=20\text{m/s}$ ，固体颗粒为聚氯乙烯颗粒，粒径 $d_{pvc}=100\mu\text{m}$ ，颗粒自然堆集密度 $\rho_{pvc}=0.56\text{t/m}^3$ 。

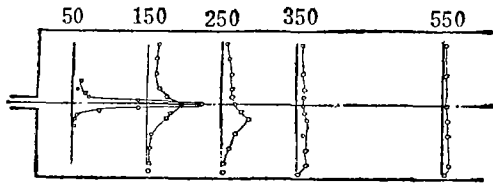


图4 $x-y$ 平面内颗粒浓度分布 ($z=0$)

由图4可知，在 y 方向上，刚进入燃烧室时，颗粒集中于入口处下游，反映在 $x=50\text{mm}$ 截面上，颗粒浓度呈一突峰分布。到 $x=150\text{mm}$ 截面时，颗粒仍集中在燃烧室中间部位，直到 $x=350\text{mm}$ 之后，颗粒浓度分布才较平坦，即在 y 方向颗粒已充满燃烧室大部分空间，但在壁面附近无颗粒。

由图2知道在 $x=150\sim 200\text{mm}$ 时，气流已向下偏转，形成附壁射流。因此，比较图2和图4，可以看出，颗粒由入口进入燃烧室之后，与气流发生了分离，气流向下偏转，而颗粒在其惯性力作用下 ($\rho_{pvc} > \rho_{air}$)，直接进入了回流区III中。同时，底层I区中，颗粒浓度几乎为零。

另外，由图5可知，在 z 方向上在燃烧室入口处，即 $x=50\text{mm}$ 截面上，颗粒也集中在燃烧室中间部位，反映在图上， $z=0\text{mm}$ 剖面上比 $z=40\text{mm}$ 剖面上颗粒浓度大得多。到 $x=150\text{mm}$ 时， $z=0, 20, 40$ 三个剖面上颗粒浓度差别减少。到 $x=350\text{mm}$ 时， z 向颗粒浓度分布也较平坦。

由于燃烧室进口速度 u_{in} 为水平方向，两相流中空气密度 ρ_{air} 小于聚氯乙烯颗粒密度 ρ_{pvc} ，颗粒在其水平惯性动量作用下，保持其一定的水平运动方向，因而与气流发生分离，从而直接进入了回流区域。当燃烧煤粉时，由于煤粉密度 ρ_c 大于实验用聚氯乙烯颗粒密度 ρ_{pvc} ，因此，在燃烧室入口处，煤粉颗粒与气流的分离效果将更加明显。

在燃烧室上游入口处，颗粒集中于中间部

位，有利于形成高浓度点燃区；其后，颗粒进入高温回流区，有利于强化燃烧；最后，颗粒充分扩散，有利于与空气混合和燃烧。而在燃烧室底层区域，颗粒浓度几乎为零，这就为壁面不结焦创造了有利条件。

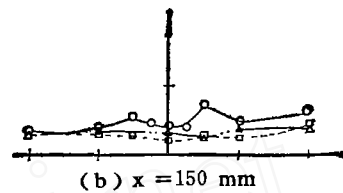
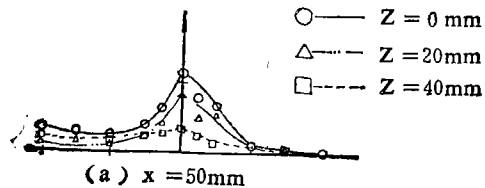


图5 $x-z$ 平面内颗粒浓度分布

四、燃烧室内温度分布

燃烧气体燃料（液化石油气）时，扁平射流燃烧室内的温度分布见图6。最高温度出现在下壁附近，火焰出现在弯曲射流段。结合流场，可以看到下部低压小回流区几乎由燃烧的高温烟气包围。此时小回流区温度高于大回流区对应点温度。当然大回流区高温烟气对火焰稳定也起部分作用。实验时还与圆形进口射流气相火焰燃烧情况进行了对比，发现扁平射流燃烧时有较低的灭火贫限。实验说明，扁平射流燃烧方式对于稳定气相火焰，特别是低热值气体燃料燃烧，也是一种值得推荐的方法。

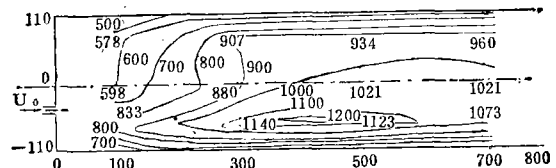


图6 气体燃烧时温度分布

燃烧煤粉时燃烧室内温度分布见图7。用液化石油气点火枪把煤粉流点燃之后，煤粉依靠回流的高温烟气即可自行稳定燃烧。由图中可知，燃烧室下部温度较低，中上部温度较

高。在中上部,当 $x > 300\text{mm}$ 之后,温度可达 $1000 \sim 1200^\circ\text{C}$;而在下壁面处, $t < 200 \sim 600^\circ\text{C}$ 。燃烧室下侧壁面处,这么低的温度无法使煤粉着火。因此,在扁平射流燃烧室内,可以说底层区是一个非反应区。

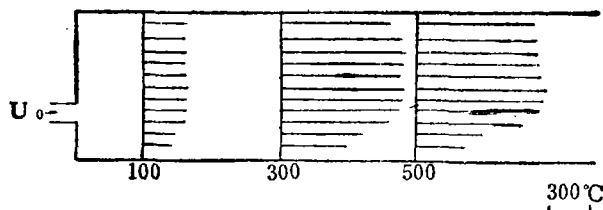


图7 煤粉燃烧时温度分布

五、燃烧室不结焦机理分析与结论

通过对扁平射流煤粉燃烧室流场、颗粒浓度场、燃烧温度场的研究及结果分析,扁平射流燃烧室在燃烧煤粉时,其不结焦特性机理分析如下。

1. 燃烧室下壁面处存在一个高速气流底层;
2. 高速气流底层处颗粒浓度几乎为零;
3. 高速气流底层处温度较低,达不到煤粉燃烧的条件。

因此,可以把底层定义为高速非反应性底层。由于该层的存在,使得扁平射流燃烧室达到了较好的不结焦性能。

另一方面,扁平射流燃烧室不仅对气体火焰有优良的稳定能力,而且对煤粉火焰也有很好的稳燃能力。这是由于:

1. 燃烧室中上部有一个较大的回流区;
2. 有相当大量颗粒直接进入高温回流区;
3. 回流区III与正流区II间有强烈的热、质交换,因而,在III区和II区均有良好的燃烧反应条件。

扁平射流燃烧室在燃烧煤粉时,其燃烧状态也可以用与三区流动简化模型相对应的三区燃烧简化模型来进行分析。如图8所示,对扁平射流燃烧室内三区燃烧状态可作如下分析。

R区——回流反应区。由于回流区温度高,进入回流区的煤粉即发生热解,挥发份和

颗粒均有燃烧,该区燃烧强度高,呈容积反应态。反应率可以写为:

$$w_s = w_g + \eta w_c, \quad 0 < \eta < 1 \quad (4)$$

其中 w_g ——挥发份的气相反应率;

w_c ——煤粉颗粒非均相反应率。

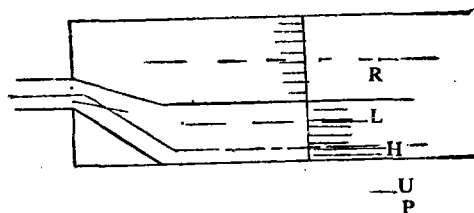


图8 三区燃烧简化模型

L区——正流点燃区。在L区流动的煤粉流,受到高温回流区的加热,流动一定距离后,达到一定温度,即被点燃,产生火焰。但在此区内主要是煤粉的热解及挥发份的点燃,而颗粒的非均相反应较弱。反应率可以写为:

$$w_L = w_g \quad (5)$$

H区——非反应底层区。在H区,不发生燃烧,该层是防止壁面结焦的重要气流结构层。其间反应率为:

$$w_H = 0 \quad (6)$$

三区流动与三区燃烧简化模型可以用来作为制定燃烧室燃烧煤粉时火焰稳定能力与不结焦性能的准则。

参 考 文 献

- [1] 卫景彬、王宏宇、黎军、李广达、吴承康,“扁平射流火焰稳定方法及其装置”,中华人民共和国专利,专利号86106725.8。
- [2] 黎军、卫景彬、王宏宇,“扁平射流燃烧室内空气动力场的实验研究”,中国工程热物理年会,1987。
- [3] N.C. Sher, “Jet Attachment and Switching in Bistable Fluid Amplifiers”, ASME, 46-FE-19, 1964。
- [4] Wu, C.K., Wei, J.B., et al, “The Use of on symmetrical Jet for the Stabilization of Low Grade Coal Flames”, 22nd symp. (Int.) on Combustion, 1988。
- [5] Wei, J.B., et al, “The Investigation of Two Dimensional Turbulent Flat Inlet Jet the Rectangular Channel Combustor”, 4th Asian Congress of Fluid Mechanics, 1989。