

# 轻油预蒸发燃烧中的稳焰技术

何宏舟

(集美大学 机械工程学院, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 介绍液体燃料预蒸发燃烧的技术原理, 分析轻油预蒸发燃烧中的火焰稳定问题, 并重点介绍目前在实现轻油预蒸发燃烧中所采用的若干稳焰措施。

**关键词:** 轻油; 预蒸发; 燃烧; 火焰稳定

中图分类号: TQ038.1 文献标识码: A

## 1 预蒸发燃烧技术原理

在液体燃料的传统燃烧过程中, 燃料是以液滴状态在燃烧区里与空气混合、蒸发, 而后燃烧。燃烧的前期阶段总是存有“液核”, 液滴的蒸发过程和燃烧过程同时发生。燃烧过程中, 随着燃料的蒸发, “液核”不断缩小直至最后消失, 整个燃烧过程可描述为:

燃烧区中油滴受热蒸发  $\Rightarrow$  与空气扩散混合  $\Rightarrow$  着火燃烧

其燃烧速度取决于燃料蒸汽的扩散速度。伴随着燃烧过程出现的问题是: (1) 当燃烧速度较大而燃料的蒸发速度较小时, 容易发生燃料裂解析碳现象, 出现不易被燃尽的碳黑沉积; (2) 难于保证燃烧区中液滴颗粒的均匀分布和液滴与空气的均匀混合, 致使发生不均匀燃烧, 燃烧过程中出现局部(点)高温, 导致热力生成  $\text{NO}_x$ 。

区别于液体燃料的传统燃烧方法, 预蒸发燃烧技术的原理是: 分离液体燃料的蒸发汽化过程和燃

烧过程, 燃料的蒸发过程先于燃烧过程发生, 在燃烧前燃料已完全蒸发并以气体状态实现了和空气的均匀混合, 燃烧速度为气体化学反应的动力速度。在液体燃料的预蒸发燃烧中, 因燃烧时燃料为汽态, 燃烧过程中不存在“液核”, 所以不存在液滴燃烧时出现的析碳现象; 同时, 因实现了均相反应, 避免了燃烧时因局部(点)高温而产生的热力  $\text{NO}_x$ 。图1比较了传统的液滴燃烧模型和液体燃料的预蒸发燃烧模型。

## 2 预蒸发燃烧中的火焰稳定问题

实现液体燃料预蒸发燃烧的关键是实现燃料着火前的预蒸发, 这需从时间和空间上分离燃料的蒸发过程和燃烧过程。工程上有许多技术可以实现液体燃料燃烧前的预蒸发, 其中, 让液体燃料在空气中直接受热蒸发是一种最经济便捷的手段。利用液体燃料燃烧的着火延迟现象和着火前的冷焰燃烧现象可以实现液体燃料直接在空气中的预蒸发<sup>[1]</sup>。

研究发现<sup>[2~3]</sup>, 采用废气循环燃烧不仅可以降低燃烧火焰温度和燃烧区内氧原子的浓度, 抑制热力  $\text{NO}_x$  的生成; 而且还延长了可燃混合物的着火延迟时间和其发生冷焰燃烧存在的温度范围, 有利于实现燃料燃烧前的完全蒸发和与空气的充分混合,

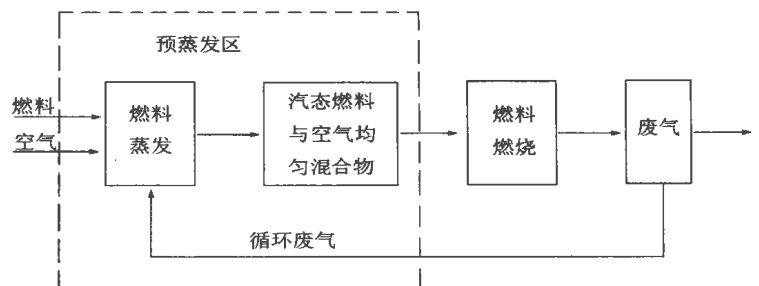
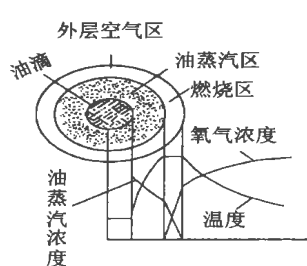


图1 液体燃料的传统液滴燃烧模型和预蒸发燃烧模型比较

收稿日期: 2001-06-06; 修订日期: 2001-07-08

作者简介: 何宏舟(1967-), 男, 福建惠安人, 集美大学博士生。

实现液体燃料的预蒸发燃烧。图 2 和图 3 分别给出了轻油“着火延迟时间随温度和废气循环率变化的影响”和“燃烧混合物中氧浓度的变化对着火和冷焰燃烧过程的影响”。由图 2 可见, 轻油的着火延迟时间随着温度的升高而缩短, 而且在同样温度条件下, 随着循环废气率的增加, 轻油的着火延迟时间明显延长; 而从图 3 可知, 在一定的压力条件下, 随着循环废气量的增加, 冷焰燃烧现象存在的温度范围明显延长。因此, 在液体燃料的预蒸发燃烧中广泛采用了废气循环燃烧技术, 以保证实现燃料在燃烧前的预蒸发。废气循环燃烧有内循环和外循环两种形式, 其中, 内循环(热废气循环)因其燃烧器结构紧凑、操作简单, 同时还能提供燃料蒸发所需的能量而在工程实践中被较多应用。

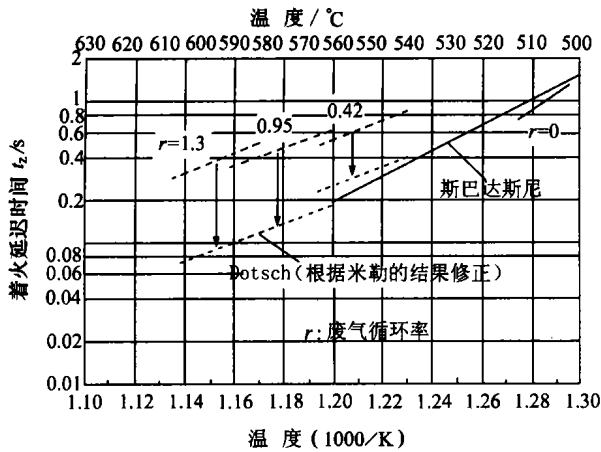


图 2 轻油着火延迟时间随温度和废气循环率变化的影响

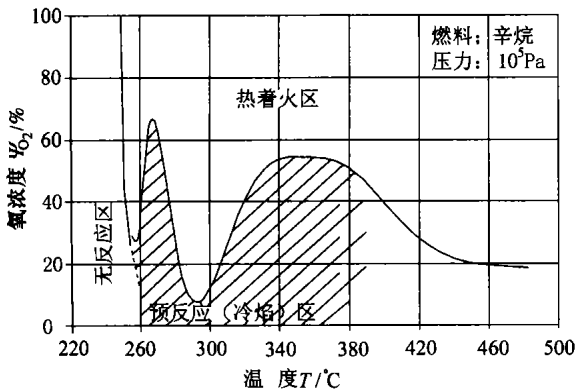


图 3 氧浓度变化对着火和冷焰燃烧过程的影响

事实上, 为减少  $\text{NO}_x$  的排放, 在液体燃料的燃烧中目前都或多或少地采用了废气循环技术。人们用废气循环率来描述参与循环燃烧的废气量。不同的文献对废气循环率有不同的定义, 其中较普遍被

采用的定义是:

$$r = \frac{m_{\text{循环}}}{m_{\text{空气}} + m_{\text{燃料}}} \quad (1)$$

式中  $r$ —循环废气率;  $m_{\text{循环}}$ —循环废气质量流量;  $m_{\text{空气}}$ —燃烧空气质量流量;  $m_{\text{燃料}}$ —燃料质量流量。

对于一般所谓的“蓝焰燃烧器”(燃烧火焰是蓝色的, 即火焰中不含碳粒子辐射), 其废气循环率  $r \leq 0.3$ 。实验研究发现<sup>[3]</sup>, 对于轻油的预蒸发燃烧, 当  $1.0 \leq r \leq 2.0$  时, 其燃烧效果最佳。这意味着在轻油的预蒸发燃烧中, 循环废气量占了可燃混合气体总量的 50% 以上。有如此多的废气参与循环燃烧, 会大大地提高燃烧器蒸发段中流体的流速, 从而带来了火焰稳定问题。

### 3 液体燃料预蒸发燃烧中的稳焰技术

我们知道, 为实现稳定燃烧, 应使锋面上火焰的传播速度等于流体的流动速度<sup>[4]</sup>。在流体速度较大时, 应设法降低流体速度, 特别是流体在火焰锋面上的推进速度, 这可以通过扩大流体流动截面和改变流体的径向和轴向的动量比例来实现; 而当流体流速较小时, 则可通过采取减少流体流动截面和提高流体压力, 设法提高流体流速等方法来实现。在利用热废气循环实现预蒸发燃烧的轻油燃烧器中, 其存在火焰稳定问题的原因在于流体流速大于其火焰传播速度。因此, 为实现其稳定燃烧, 应设法降低火焰锋面上的流体流速。目前工程上采取的技术措施主要有以下 4 种。

#### 3.1 逆置阻流筒稳焰

图 4 给出靠逆置阻流筒稳焰的轻油预蒸发燃烧器结构示意图。该燃烧器的工作原理是<sup>[5]</sup>: 油从油喷嘴喷出后与旋转的空气在火焰管中混合并实现预蒸发。在该燃烧器中, 有大量的燃烧废气参与了循环燃烧。燃烧器的工作过程分为起始和稳定运行两个阶段。在起始阶段, 为保证点火成功和火焰稳定, 通过了一股助燃空气锁闭了循环废气; 在稳定运行阶段, 油、空气和循环废气在火焰管中混合, 油实现了预蒸发并在火焰管出口处着火燃烧。在火焰管前方放置一逆向阻流筒, 起到类似弯头的作用, 改变了流动方向, 增加了流阻, 把脱离火焰筒的火焰稳定在筒内。由于逆向阻流筒改变了燃烧气体的流动方向, 使燃烧后的烟气沿火焰管逆向流出, 这不仅有利于实现热烟气的循环燃烧, 还可使热烟气传递部分

能量给火焰管中的流体, 有利轻油的预蒸发。

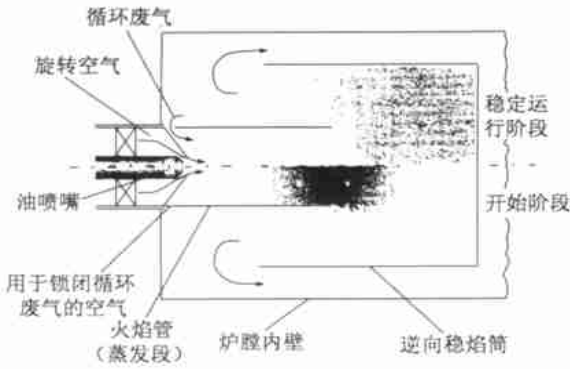


图 4 利用着火延迟现象实现预蒸发燃烧的燃烧器原理图

### 3.2 旋转空气稳焰

通过旋转燃烧空气, 不仅可加强空气与燃料的均匀混合, 更重要的是可利用因旋转扰动而产生的许多小涡旋稳定火焰。通过改变旋转空气的角度可以调整燃烧流体的径向和轴向动量比例, 使得流体(混合气体)在燃烧区域形成脉动的回流旋涡而稳定火焰。图 5 描述了靠旋转空气稳焰的轻(重)油预蒸发燃烧器的原理图<sup>[4]</sup>。该燃烧器主要由五部份组成: (A)旋转热空气; (B)重油喷管; (C)混合管; (D)火焰管(I); (E)火焰管(II)。轻(重)油经适当雾化后与旋转的热空气在混合管中先混合, 有部分开始蒸发, 也有小部分开始与热空气发生预反应, 在火焰管(I)和火焰管(II)中重(轻)油与空气(包括循环废气)继续发生预燃烧和缓慢反应, 在火焰管(II)内完全蒸发并在出口处着火, 火焰通过自身旋转被稳定在火焰管(II)出口处。

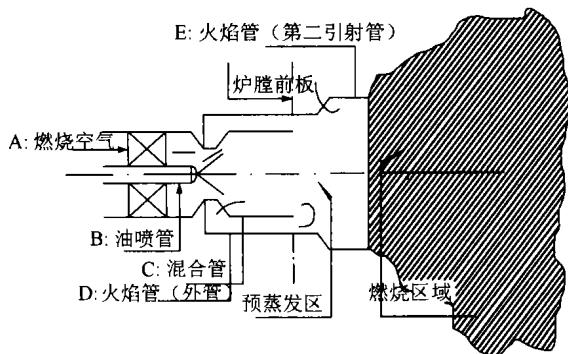


图 5 采用预蒸发技术的重油燃烧器原理图

### 3.3 网格阻流稳焰

图 6 是一个利用网格阻流稳焰, 采用预蒸发燃

烧技术的轻油表面辐射燃烧器结构示意图<sup>[7]</sup>。该燃烧器的工作过程分起始预热阶段和稳定运行阶段。其工作原理是: 在起始预热阶段, 轻油经油喷嘴雾化后与部分旋转的空气在火焰管中混合, 利用高压电火花启动燃烧器, 首先让其实现蓝焰燃烧, 燃烧火焰被稳定在火焰管中。燃烧后的烟气有部分因引射作用通过火焰管根部所开的小孔被吸进火焰管, 参与循环燃烧; 绝大多数热烟气从燃烧器的表面网孔流出并对之进行预热, 当燃烧器表面网孔灼热微红时, 则结束预热阶段, 让燃烧器转入稳定运行即表面燃烧阶段。通过选择合适的网孔表面材料和火焰管长度(此时火焰管发挥了类似蒸发管的作用), 以及适量的燃烧空气系数, 可以使得燃料在火焰管中的停留时间小于其着火延迟时间, 实现燃料在燃烧器壳体内腔中的预蒸发。这里, 轻油和经预热的空气以及部分循环的流体在火焰管内发生预反应, 同时也从燃烧器网孔内表面辐射受热, 实现了自身在燃烧器内部壳体空间里的完全蒸发和与空气的均匀混合, 经网孔导出后在燃烧器外表面均匀燃烧。其中, 燃烧器外表面的复层合金网孔发挥了阻流稳焰的作用, 火焰随过量空气系数的变化被稳定在燃烧器网孔表面出口的某一位置上。该燃烧器具有低 NO<sub>x</sub> 燃烧、低噪音排放和结构紧凑等特点。

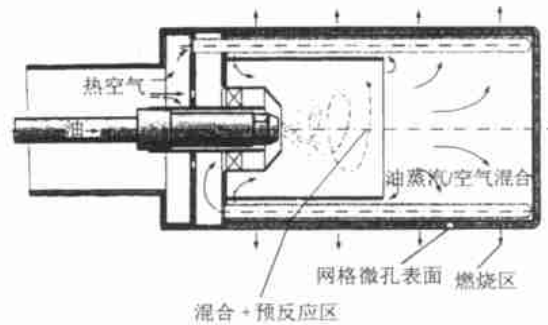


图 6 采用预蒸发技术的轻油表面辐射燃烧器原理简图

### 3.4 蜂窝驻流稳焰

图 7 为利用蜂窝结构驻流稳焰、含尾气除硫和利用凝结热的轻油预蒸发燃烧器结构示意图<sup>[8]</sup>。该燃烧器结合冷焰燃烧技术和蜂窝技术于一体, 具有低有害物质排放、低噪音排放、高能流密度传递、易调节和结构紧凑等特点。其工作原理类似于表面辐射燃烧器: 燃烧器的工作过程分两个阶段——起始预热阶段和蜂窝燃烧阶段。在起始预热阶段, 先让燃料在燃烧器的蒸发管中发生蓝焰燃烧, 燃烧后的

热烟气通过燃烧器的蜂窝微孔流出, 并对蜂窝微孔结构进行预热。当蜂窝微孔腔体被预热至  $800\text{ }^{\circ}\text{C}$  左右时, 停止预热启动, 燃烧器转入蜂窝微孔燃烧阶段。此时, 燃油经油喷嘴喷入燃烧器内蒸发筒, 在此与预热的空气和部分循环流体混合并发生冷焰燃烧, 使得燃油在进入蜂窝微孔燃烧室前实现预蒸发。可燃混合气体在炽热的蜂窝腔体里自燃, 火焰被稳定在微孔燃烧室内。为保障当功率大范围调节时燃烧区域中的火焰稳定, 可以这样来设计蜂窝结构, 使得底部(可燃流体入口处)腔体的尺寸足够小, 以阻止在此处发生燃烧反应; 而顶部蜂窝腔体的尺寸足够大, 以保证燃烧反应在此能够顺利进行。

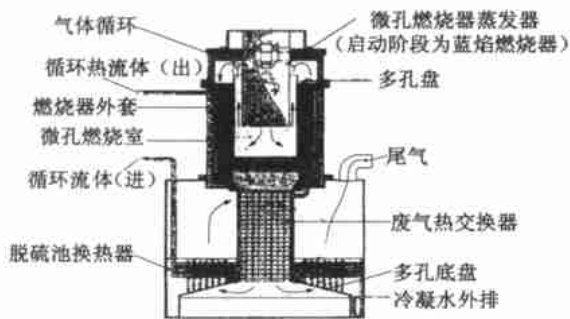


图 7 蜂窝微孔驻流稳焰的轻油预蒸发燃烧器结构示意图

## 4 结语

(1) 预蒸发燃烧技术的原理是: 通过分离液体燃料的蒸发过程和燃烧过程, 实现液体燃料的“气体化”燃烧;

(2) 燃烧过程中实现火焰稳定的关键是使火焰锋面上流体的扩散速度等于火焰的传播速度。在液

体燃料的预蒸发燃烧中, 为保证实现燃料在燃烧前的预蒸发, 一般采用了大量的热废气(或流体)参与循环燃烧, 于是增大了燃烧器蒸发段中流体的流速, 带来了火焰稳定问题;

(3) 在轻油的预蒸发燃烧中, 可通过布置逆向阻流筒, 旋转燃烧空气, 采用复层网孔燃烧表面和蜂窝微孔腔体燃烧结构等措施来稳定火焰。

## 参考文献:

- [1] 何宏舟, KOEHNE H. 轻油的预蒸发燃烧—预蒸发燃烧技术原理及实践[J]. 工业锅炉, 2001(3): 2-8.
- [2] LUCKA K, KOEHNE H. Moderne gemischaufbereitung fuer fluessige brennstoffe [A]. 3 Aachener Kolloquium Heizwaerme aus Oelverbrennung [C]. Aachen: Shaker Verlag, 2000. S. 35-42.
- [3] DOETSCH C. Trennung der verbrennung von der verdampfung und der gemischbildung bei einem oelbrenner durch ausnutzung der zündverzugszeit [D]. Dissertation RWTH - AACHEN, 1999. ISBN: 3-8265-6868-0. ISSN: 1430-9629.
- [4] WARNATZ J, MASS U, DIBBLE R W. Verbrennung[M]. 2. Auflage. Springer Verlag Berlin, 1997.
- [5] DOETSCH C, KOEHNE H. Emissionsarmer vorverdampfungsbrenner mit stabilisierung im umkehrerinsatz [J]. Schornsteinfeger. Heft 4 1998; S.4-10.
- [6] MUELLER H J. Feststoff und sauerstoffames rauchgas aus nahstoichiometrischen schwereol - luftflammen (Blauflammen) [D]. Fortschritte-Bericht VDI Reihe 15 Nr. 43. Duesseldorf: VDI-Verlag, 1986.
- [7] GITZINGER H P, KOEHNE H. Nutzung“ kalter flammen ” zur entwicklung eines strahlungs-brenners fuer fluessige brennstoffe [A]. GVC - Fachausschuss “ Thermodynamik ” und VDI - GET “ Thermodynamik - Kolloquium 1998 ” [C]. Referat Nr. 47. Leipzig 1998.
- [8] HEIDERMAN T, HATZFELD O, KOEHNE H. Der oelporen-brenner fuer die haushaltssteuerung [J]. VDI Berichte Nr. 1492 1999. S. 623-628.

( 辉 编辑 )

(上接第 401 页)

(2) 根据非牛顿流体的指数定律建立组合阀的数学模型, 其物料流率的计算值与实验值吻合较好, 可以用来计算组合阀的物料流率。

本研究的实验在清华大学“煤的高效低污染燃烧国家重点实验室”进行。

## 参考文献:

- [1] 戴维森 J F, 哈里森 D. 流态化[M]. 北京: 科学出版社, 1981.

( 渠 源 编辑 )

rules. The author has come up with a method called "rough set" (or RS for short) to serve as a new method of machine self-learning. The RS can automatically acquire diagnosis knowledge from a huge quantity of rotating machine data, decrease erroneous diagnoses and phenomena of missing diagnosis. Also described are RS working principles, its operating method and practical usage examples. **Key words:** fault diagnosis, rotating machine, machine self-learning, rough set

电子束湿法烟气脱硫工艺 = **Electronic Beam and Wet Method-based Flue Gas Desulfurization Technology** [刊, 汉] / CHOU Qiao-li (Dalian Bingshan Group Co. Design and Research Institute, Dalian, China, Post Code: 116033) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —2002, 17(4). 405~407

A concept involving an electronic beam and wet method-based technology is proposed for flue gas desulfurization, which comprises three vertical, wet-type equipment items. Among them, a pressure-type fog-spray drying device is used to dry ammonium salt solution, rendering it into grain particles. It also enables flue gases containing SO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> to be cooled and humidified. Then, the flue gases after being cooled, humidified and electron beam radiated by a vertical cooling and radiation tower are made into aerosol micro-particles of ammonium salt to be separated by a sieve-plate type adsorbing tower and washed clean to form an ammonium salt solution. The results of a feasibility study and preliminary design of the process indicate that the latter can attain a desulfurization rate of 98%, NO<sub>x</sub> removal rate of 70% and a dust collection rate of 99%. Moreover, the electron beam radiation dosage, circulating solution flow-rate and flue gas flow resistance are all reduced simultaneously. The technology under discussion also features a simple flow process, ease of control, a low requirement for equipment, power consumption and space, and a large particle size of by-products. **Key words:** electronic beam, wet method, flue gas desulfurization

电站锅炉掺烧煤泥可行性研究 = **Feasibility Study of Burning Peat as a Subsidiary Fuel in Utility Boilers** [刊, 汉] / DUAN Shi-fang (Xuzhou Ducheng Electric Power Co. Ltd., Xuzhou, China, Post Code: 221142) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —2002, 17(4): 408~409

A feasibility study of burning peat as a subsidiary fuel in utility boilers indicates such an approach is realistic. A normal operation of boilers with rated parameters can be achieved without any modification of related equipment and systems. This will result in sizable economic and social benefits as well as good environmental conditions. The burning of peat as an added fuel conforms to State policy regarding the comprehensive utilization of energy resources and has wide prospects of development in addition to playing an exemplary role in energy use. The author has also pointed out some issues worthy of due attention during the design and operation of boilers firing peat as a subsidiary fuel. **Key words:** boiler, peat, mixed burning, drying system

轻油预蒸发燃烧中的稳焰技术 = **Flame Stabilization Techniques during the Pre-evaporative Combustion of Light Oil** [刊, 汉] / HE Hong-zhou (Mechanical Engineering Institute under the Jimei University, Xiamen, China, Post Code: 361021) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —2002, 17(4): 410~413

The technical principles of pre-evaporative combustion of liquid fuels are described and the problem of flame stabilization during the pre-evaporative combustion of light oil is analyzed. Also highlighted are several measures currently adopted for flame stabilization during the pre-evaporative burning of light oil. **Key words:** light oil, pre-evaporation, combustion, flame stabilization

万丰热电厂2号燃油锅炉改烧水煤浆工程实例 = **The Retrofitting of No. 2 Oil-fired Boiler at Wangfeng Power Plant for Burning Water-coal Slurry** [刊, 汉] / YOU Xiao-bo QIU Zhou-wei, LIU Xue-gui, et al (Wangfeng Thermal Power Plant, Shantou, China, Post Code: 515000) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —2002, 17(4): 414~417

The specific features of and difference between oil-fired boilers and coal-fired ones are briefly described and analyzed. Meanwhile, a detailed account is given of the retrofitting of a No. 2 oil-fired boiler at Wangfeng Thermal Power Plant for burning water-coal slurry along with a description of its main operating parameters. **Key words:** oil-fired boiler, water-coal slurry, design study