

“水包油”型乳化重油燃烧与排放的实验研究

龚景松 贾云涛 何裕昆 傅维镛
(清华大学 航天航空学院 北京 100084)

摘 要: 实验研究了含水 30% “水包油”型乳化重油的燃烧与污染物排放特性。燃烧在一维卧式炉上进行,采用专门针对乳化油设计的喷嘴、燃烧器和乳化油加热系统。实验过程中观察了喷嘴雾化和火焰状态,并测量了炉膛内不同剖面的温度分布、氧气浓度分布和 NO 分布。 “水包油”型乳化重油的燃烧实验表明,此类乳化重油完全可以在工业设备上代替柴油使用,对缓解我国的能源形势紧张和环境保护具有重要意义。

关 键 词 “水包油”型乳化重油; 燃烧特性; 喷嘴; 节能; 降低污染

中图分类号: TK16 文献标识码: A

引 言

石油及其产品(汽油、柴油、重油等)由于其使用的优越性,在能源利用中的比例越来越大^[1],经过石油炼制后的重渣油直接燃烧时,操作条件要求高,如要将油的温度加到足够高(100℃或120℃以上)来保证雾化,条件稍有改变,就会产生碳烟,污染环境,同时由于其粘度很大,对运输也提出了很高的要求。为此,如何降低其粘度,并将此类油制成“水包油”型的乳化油,则可以降低其粘度,还可以降低对环境的污染。

对于乳化重油的燃烧,国内外都进行了一定的研究工作^[2~5],多是针对“油包水”型乳化重油的。对于“水包油”型的乳化油,由于水分为连续相,其

蒸发过程需要吸收大量潜热而使炉膛温度降低,导致燃烧的不稳定。通过对燃烧过程的分析可以得到,如果能够保证乳化重油的良好雾化、高温烟气的有效回流,就可以保证燃烧的稳定。本研究的目的是在专门设计的喷嘴和燃烧器上研究“水包油”型乳化重油的燃烧特性,同时对所设计的喷嘴和燃烧器的性能进行验证。

1 乳化重油的性质

乳化重油是重油与水形成的液-液的分散体系或乳状液,可分为油包水型(W/O)和水包油型(O/W)两类。使用乳化燃料有一些显著优点^[6]:它可以提高燃料的利用效率,同时,最主要的是它可以降低 NO_x 等有害气体和固体颗粒物的排放,降低对环境的污染。

本研究的乳化油为一种“水包油(O/W)”型的超稠油乳化油,由超稠油(常温接近固态)经过加热、与水在乳化剂的作用下经过机械剪切作用而形成的乳化油,密度(15.6℃)1.02 g/cm³,灰分0.36%,含水量为30%,分散相(油滴)平均半径6.07 μm,具有较好的流动性,其性质如表1所示。试验表明,稳定时间可保持一年以上,具有很好的稳定性。

表 1 超稠油乳化油的性质

Tab. 1 Properties of a super dense oil-emulsified oil

热值/MJ·kg ⁻¹		粘度/mm ² ·s ⁻¹				元素分析(W%)				
高位	低位	10℃	30℃	50℃	70℃	碳	氢	氧	氮	硫
28.06	27.04	76.5	44.3	31.4	21.0	61.5	11.2	26.7	0.29	0.30

2 燃烧系统

在燃料的燃烧中,燃料的雾化和燃料与空气的混合、着火燃烧过程决定着燃料燃烧性能的优劣。

前期已经对乳化油的蒸发、着火特性进行了深入的研究,并发展了一种新型的旋转型气液雾化喷嘴和设计了一回流区可调的燃烧器^[7~8],均安装在实验所用的一维卧式炉上,其结构如图1所示。炉体为φ600 mm×3 000 mm 的直桶型,采用双层结构,

收稿日期: 2011 - 01 - 07; 修订日期: 2011 - 04 - 18

作者简介: 龚景松(1975 -),男,天津人,清华大学讲师,博士。

可以对部分空气进行预热,在炉膛的尾部有冷却水,烟气经过冷却后由引风机引出。在炉体的前端安装专门设计的燃烧器,将燃烧用的空气分为3股:根部风 Q_g 、一次风 Q_1 和二次风 Q_2 ,二次风经过炉体夹层加热后,再送入炉膛供给燃烧。喷嘴的出口在燃烧器与炉体的交接处,由供油系统提供燃烧所用的燃料。同时在燃烧器的头部装有高能点火器,通过放电来点燃燃料。

重质燃料油在燃烧时,为了更好地雾化,需要对重油进行预热,由于乳化油中含有水,因此不能使用加热器直接对其加热,而是采用水浴加热的方法,乳化重油加热温度控制在 $60 \sim 70 \text{ }^\circ\text{C}$ 为宜。

3 实验结果及分析

实验过程中测量了乳化重油燃烧过程的火焰温度、烟气温度、燃烧特性,喷嘴的雾化特性以及排放特性等指标,从而揭示乳化油的燃烧特性。火焰温度的测量使用B型(铂铑30-铂铑6)热电偶配合显示仪表,乳化重油的温度使用E型(镍铬-康铜)热电偶配合显示仪表,油与雾化风的压力量程为

1 MPa 的压力表,雾化风的流量使用玻璃转子流量计来测量,燃烧的风量测量用玻璃转子流量计来测量,尾气成份用KM900型烟气分析仪测量。

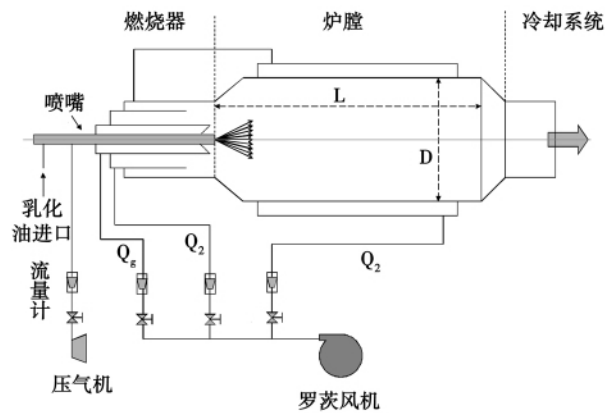


图 1 一维卧式炉系统简图

Fig. 1 Schematic drawing of a one-dimensional horizontal type boiler system

当燃烧乳化重油达到稳定后,系统各部分的运行参数如表2、表3所示。

表 2 喷嘴的运行参数

Tab. 2 Operating parameters of the nozzles

乳化油			雾化风		
油量/ $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$	油温/ $^\circ\text{C}$	油压/ MPa	风量/ $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$	风温/ $^\circ\text{C}$	风压/ MPa
140	$50 \sim 60$	0.4	7.0	室温	0.4

表 3 供风参数

Tab. 3 Air supply parameters

根部风		一次风		二次风	
流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	温度/ $^\circ\text{C}$	流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	温度/ $^\circ\text{C}$	流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	温度/ $^\circ\text{C}$
200	室温	200	室温	920(室温)	$50 \sim 100$

由于热态情况下无法对喷嘴的雾化状态直接进行测量,所以对喷嘴的雾化和燃烧状态进行了拍照,来进一步观察雾化的好坏如图2~图3所示。从照片中可以看出,雾化后油膜形成的雾化锥很明显,同时油膜也非常的薄,在出口0.1 m处开始着火燃烧。炉内火焰明亮,火焰的充满度好,火焰处的热电偶显示,火焰中心处的温度达到了 $1400 \sim 1450 \text{ }^\circ\text{C}$,排烟透明,燃烧状态良好。甚至当尾部测量的氧气浓度为零时,仍没有明显的碳烟生成,分析原因主要是水分的加入对碳烟起了抑制作用。

图4为不同剖面的温度分布的测量结果及与计

算结果的对比(计算过程参见文献[9]),剖面的位置为距离喷嘴出口0.3、0.7和1.2 m处,从图中可以看出,距离喷嘴越近的剖面,其温度呈现出中心温度和壁面温度低,距离中心一定距离处温度高的钟形分布特点,反应出射流燃烧的典型特点,从实验结果还可以看出,距离喷嘴0.3 m的中心处,其最低温度已经达到了1200 K以上,从而可以推测,回流区起到了很好的回流作用,使大量的高温烟气回流,提高了中心温度,能够保证乳化油的吸热蒸发,促进了燃料的着火和燃烧。

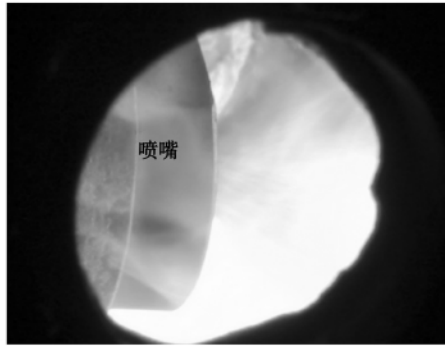


图 2 喷嘴的雾化状态

Fig. 2 Atomization status of the nozzles



图 3 乳化油的燃烧状态(从尾部拍照)

Fig. 3 Combustion state of the emulsified oil(photograph taken from the tail portion)

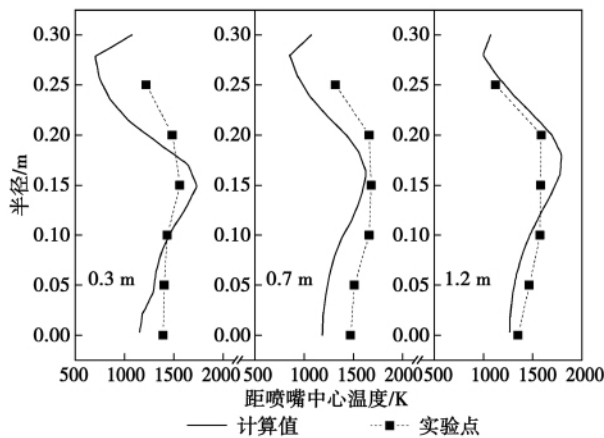


图 4 计算的温度分布与实验测量结果的对比

Fig. 4 Comparison of the calculated temperature distribution with the test one

图 5 为一维炉的火焰部分的氧气浓度分布,剖面的位置为距离喷嘴出口 0.3、0.7 和 1.2 m 处,从图中可以看出,火焰中心部分的氧气浓度几乎达到了零,沿半径方向浓度逐渐增加,到壁面附近达到较

高的浓度,同时随着离喷嘴的距离增加,氧气浓度逐渐降低,表明越来越多的氧气卷入到回流区中参与燃烧,从而被消耗。

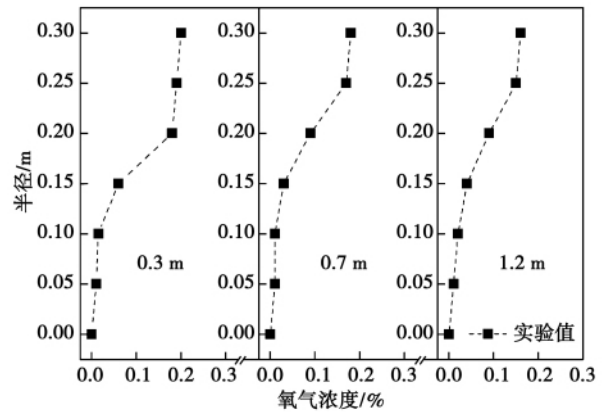


图 5 距喷嘴中心不同距离处的实验测量的氧气浓度分布

Fig. 5 Oxygen concentration distribution measured during the test

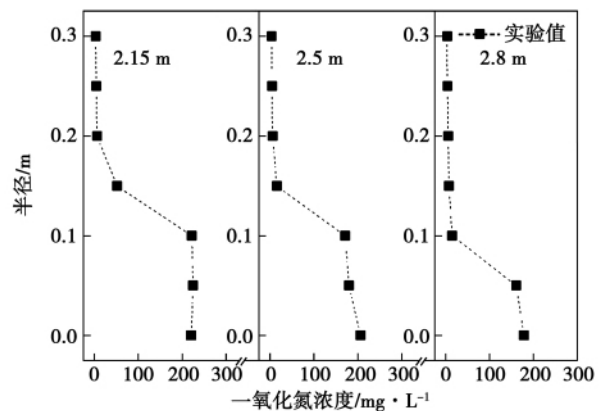


图 6 不同剖面的氮氧化物浓度分布(6% O₂)

Fig. 6 Nitrogen oxide concentration distribution in various sections(6% O₂)

图 6 为不同剖面的氮氧化物浓度分布,剖面的位置为距离喷嘴出口 2.15、2.5 和 2.85 m 处,在火焰的尾部,图中的 NO 值为实际的测量值根据氧气浓度换算到 6% 氧气浓度下的测量值。从图中可以看出,乳化重油燃烧时,其 NO 排放很低,尾气基本不需要采取任何的后处理就可以达到排放标准而直接排放。

4 加水降低碳烟生成的机理分析

采用乳化燃烧后,碳烟的形成非常少,加水降低

碳烟量的机理 主要存在以下三方面因素:

(1) 碳烟生成的条件是高温缺氧。掺水燃烧时,由于水的汽化吸热和三原子分子的辐射,整体的温度水平降低,实验的结果表明,碳烟的量与温度的关系在 2 000 K 以下(在很高的温度下,碳烟的生成量与温度的关系曲线为一钟型,先升高、再降低^[10])。基本满足 $Y_{\text{soot}} \sim \exp(-\frac{E}{RT})$ 。因此当温度降低时,使能生成碳烟的温度范围缩小,碳烟量也降低,当温度过低时,就没有碳烟生成。

(2) 在高温区加水以后,加强了高温区 $\text{H} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{OH} + \text{H}_2$ 反应,所生成的羟基的氧化作用是氧分子的 5 ~ 10 倍^[11],使得碳原子刚形成就被氧化掉。

(3) 所形成的碳原子也可以与水蒸气发生水煤气反应,虽然此反应比与氧气的反应慢许多,但是在燃烧火焰中心区,正是高温缺氧的地方,在很大范围内氧气浓度为零,而水分的浓度相对较高,此反应将成为降低碳烟的主要途径。

为了降低碳烟的生成与排放,采用了不同的方法,如提高过量空气系数、加强燃料与空气的混合和烟气再循环等,但是普遍公认的有效方法是加水燃烧。水加入到燃烧区的方法主要有三种:第一,将水喷入空气中被带入系统;第二,水直接喷到燃烧区;第三,水以乳化油的形式被带入系统。其中以乳化油技术更具有吸引力,它不需要独立的储水装置和供水系统,使得运行方便。水的加入不但可以降低氮氧化物,而且可以明显降低碳烟的生成,同时在适当的运转条件下还可以略微提高效率。

5 结 论

“水包油”型乳化重油在一维炉上的燃烧实验结果表明:

(1) “水包油”型乳化重油在专门设计的喷嘴和燃烧器上可以稳定燃烧,排放的碳烟和 NO 均很低,完全可以用在工业锅炉上,是一种优质的清洁燃料。

(2) 对于“水包油”型乳化油,在燃烧器设计时,应尽量使高温回流区靠近喷嘴,以保证水的快速蒸发。

(3) 在一维炉的情况下,此前设计的喷嘴可以很好地工作,对水包油型乳化重油的雾化是有效的。

乳化燃料的应用对于重油燃烧中污染物排放的降低是一个非常有效的方法,特别是碳烟和氮氧化物的排放可以得到很好的改善,乳化油的应用对于

发展低 NO_x 燃烧设备很有价值。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国海关总署. 2009 年 12 月进口重点商品量值 [EB/OL]. <http://www.customs.gov.cn/publish/portal0/tab2453/module72494/info209227.htm> 2010 年 1 月.
General Administration of Customs of the people's Republic of China, Quantity of Key Imported Commodities in Dec. 2009 [EB/OL]. <http://www.customs.gov.cn/publish/portal0/tab2453/module72494/info209227.htm> Jan 2010.
- [2] 夏刚. 燃用乳化重油在 6300ZC 柴油机的试验 [J]. 宁波大学学报(理工版) 2005, 18(1): 110 - 113.
XIA Gang. Fuel-purpose Emulsified Oil Experiment in a 6300ZC Diesel [J]. Journal of Ningbo University (Edition of Science and Technology) 2005, 18(1): 110 - 113.
- [3] Javier M Ballester Norberto Fueyo Cesar Dopazo. Combustion characteristics of heavy oil-water emulsion [J]. Fuel 1996, 75(6): 695 - 705.
- [4] Rene Ocampo-barrera, Rafael Villasenor. An Experimental Study of the Effect of Water Content on Combustion of Heavy Fuel Oil/Water Emulsion Droplets [J]. Combustion and Flame 2001, 126, 1845 - 1855.
- [5] 许晓斌, 周忠国, 许金山, 等. 节能环保型重油乳化技术的研究开发 [J]. 齐鲁石油化工 2010, 38(1): 39 - 42.
XU Xiao-bin, ZHOU Zhong-guo, XU Jin-shan, et al. Study and development of energy-saving and environment protection type heavy oil emulsification technologies [J]. Qilu Petroleum and Chemical Industry 2010, 38(1): 39 - 42.
- [6] 傅维标, 葛阳. 正确认识油掺水燃烧的节能降污机理 [J]. 中国能源 1998, 2: 29 - 32.
FU Wei-biao, GE Yang. Correct understanding of the mechanism of the combustion by mixing oil with water to save energy and reduce the pollutants [J]. China Energy Source 1998, 2: 29 - 32.
- [7] 龚景松, 傅维标. 旋转型气-液雾化喷嘴流量特性的实验研究 [J]. 热能动力工程 2004, 19(4): 376 - 379.
GONG Jing-song, FU Wei-biao. Experimental study of the flow characteristics of a rotary type gas-liquid atomization nozzle [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power 2004, 19(4): 376 - 379.
- [8] 傅维标, 龚景松. 改变进气流量实现可调回流区位置的研究 [J]. 热能动力工程 2004, 19(5): 495 - 497.
FU Wei-biao, GONG Jing-song. Study of the realization of the location of adjustable return flow zone by changing the air admission flow rate [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power 2004, 19(5): 495 - 497.
- [9] 龚景松. 重质燃料油燃烧规律的研究 [D]. 北京: 清华大学 2003.
GONG Jing-song. Study of the Combustion Law Governing the Heavy Mass Fuel Oil [D]. Beijing: Mechanics Department, Tsinghua University, 2003.
- [10] Alexiou A, Williams Alan. Soot formation in shock-tube pyrolysis of pyridine and toluene-pyridine mixtures [J]. Fuel 1994, 73: 1280 - 1283.
- [11] Smooke M D, Mcenally C S, Pfeifferle L D. Computational and experimental study of soot formation in a coflow [J]. Laminar Diffusion Flame, Combustion and Flame 1999, 117: 117 - 139.

(陈 滨 编辑)

Heat Pipe [刊, 汉] ZHENG Jun (Iron Smelting Cause Department , Zhongye Saidi Engineering Technology Stock Co. Ltd. , Chongqing , China , Post Code: 400013) , HE Chuan(College of Power Engineering , Chongqing University , Chongqing , China , Post Code: 400044) , ZHANG Guang-hui (National Key Laboratory on Mechanical Transmission , Chongqing University , Chongqing , China , Post Code: 400044) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2012 27(1) . -43 ~50

Proposed was a new elbow type integral pin-fin rotary heat pipe. A detailed theoretical design and analysis were performed of the heat pipe under discussion. Moreover , the heat transfer performance of the heat pipe was also tested. It has been found that the temperature of the heat pipe along the axial direction will gradually decrease from the vaporization section to the condensing section and the maximum axial temperature difference will decrease with an increase of the rotating speed. The tube wall temperature of the vaporization section of the heat pipe along the circumferential direction will increase while that of the condensing section will decrease with an increase of the rotating speed. The overall heat transfer - converted power of the heat pipe will increase with an increase of the rotating speed. When the liquid filling rate is about 15% , the heat resistance of the heat pipe will be the minimum with the heat transfer performance being the best. The influence of the liquid absorption core on the heat transfer performance of the heat pipe will not dominate. At a low speed , the liquid absorption core can enhance the heat transfer capacity while at a high speed it will lower its heat transfer capacity. Compared with the heat transfer performance of a parallel axis rotary heat pipe , that of the elbow type rotary heat pipe increases by 6 times. **Key words:** rotary heat pipe , integral pin - fin , heat transfer performance , liquid filling rate

“水包油”型乳化重油燃烧与排放的实验研究 = Experimental Study of the “Oil-in-water” Type Emulsified Heavy Oil Combustion and Emissions [刊, 汉] GONG Jing-song , JIA Yun-tao , HE Yu-kun , FU Wei-biao(Aeronautics and Astronautics College , Tsinghua University , Beijing , China , Post Code: 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2012 27(1) . -51 ~54

Experimentally studied were the combustion and pollutant emissions characteristics of a “oil-in-water” emulsified heavy oil with a water content of 30%. The combustion was performed in a one-dimensional horizontal boiler and nozzles , burners and emulsified oil heating system specially designed for emulsified oil were used. During the test , the atomization and flame morphology of the nozzles were observed with the temperature , oxygen concentration and NO distribution in various sections of the furnace being measured. The combustion test of the “oil-in-water” emulsified heavy oil shows that such a kind of emulsified heavy oil can be totally used in industrial equipment items instead of diesels and this has a major significance for easing the tension in energy source and environment protection in China. **Key words** “oil-in-water” type emulsified heavy oil , combustion characteristics , nozzle , energy-saving , pollution mitigation