

# 背压环境下压力喷嘴雾化特性实验研究

张亮<sup>1</sup> 陆振华<sup>1</sup> 刘玉峰<sup>2</sup>

(1. 上海交通大学 动力机械及工程教育部重点实验室, 上海 200240; 2. 中国船舶工业系统工程研究院, 北京 100036)

**摘要:** 自主设计一套能够为喷嘴提供稳定背压环境的实验台架和数据采集测量系统, 并对某型号压力喷嘴进行背压环境下的雾化特性实验研究。本研究运用微小流量计测量喷嘴流量, 经计算得到实验喷嘴的流量系数。雾化锥角随背压的增加而减小, 最终趋于稳定值。粒径变化规律为: 在距离喷口较远处, 相同压差条件下雾化粒径随背压的增大而减小(约20%); 距离喷口较近时, 背压越大雾化粒径越大, 增幅为10%~20%。在背压低于0.3 MPa时, 同一高度处不同压差下雾化粒径大小差别明显; 在背压达到0.4 MPa时, 实验压差对雾化粒径无显著影响, 粒径大小变化小于5%。

**关键词:** 背压; 压差; 流量特性; 雾化锥角; 粒径分布

中图分类号: TK411.1 文献标识码: A

DOI: 10.16146/j.cnki.rndlge.2016.04.012

## 引言

喷嘴具有广泛的用途, 在燃烧设备上的应用尤为常见, 是各类燃烧装置上必不可少的组件。喷嘴雾化是指通过喷嘴把液体以高速喷入气体介质, 使其分散并碎裂, 最终形成小颗粒液滴的过程<sup>[1]</sup>。燃油喷嘴是将燃料雾化, 形成细小雾滴, 以便更快蒸发, 更快地和空气混合。进而能够保证燃料在燃烧室内迅速点火, 稳定燃烧。

目前, 针对各类喷嘴的雾化特性众多学者已经做了相当多的研究。文献[2]研究了横向气流对雾化粒径的影响规律; 文献[3]研究了轴流风速下的喷嘴外流场; 文献[4]研究了喷嘴结构对雾化特性的影响; 文献[5]根据力学比拟原理提出了TAB(雾滴破碎)模型。

现有文献中较多的是研究喷嘴在开放的大气环境中进行喷射雾化, 然而在液体火箭发动机、燃气轮机和航空发动机等动力装置中, 喷嘴的工作环境存

在很高的背压, 这必将会影响喷嘴的雾化特性, 然而在这方面的研究相对较少。喷嘴雾化的主要性能指标有流量特性、雾化锥角和粒径分布等。考虑到燃油喷嘴一般都是在高温高压环境下进行工作, 针对喷嘴雾化的背压环境, 本研究自主设计一套能够为喷嘴提供稳定背压环境的实验台架, 以及数据采集和测量系统, 并运用此实验系统对某型号的喷嘴进行背压环境下的雾化特性实验研究。本研究为背压环境下喷嘴雾化性能的研究与优化提供参考。

## 1 实验装置

实验系统简图如图1所示, 其由实验装置和测量装置两部分组成。实验装置主要包括密闭缸体、实验喷嘴、空压机和柱塞水泵。密闭缸体是实验装置的主体, 其3个方向的壁面上各有1个玻璃观测窗, 通过观测窗可以测量喷嘴的雾化锥角和粒径分布情况; 其顶部配备了液压表和气压表, 用来测量喷雾液体压力和缸体内部的喷嘴实验背压。该缸体与空压机相连接, 空压机向缸体内部充入压缩空气用以提供并维持稳定的背压实验环境, 依据缸体的密封能力和抗压能力, 本研究设计的背压实验工况值为0.0、0.1、0.2、0.3和0.4 MPa(表压)。本实验设计实验压差值为0.6、0.8、0.9、1.0、1.2、1.4、1.5和1.6 MPa, 根据压差和背压进行两两组合, 即可确定实验时所需的喷嘴进口压力, 通过调节调压阀开度来调节喷嘴进口压力, 同时实验采用回流调节, 以保证在实验过程中供水压力的稳定。密闭缸体的上部可以装入喷嘴, 喷嘴与柱塞泵连接, 调节水泵供水压力以满足所需压差实验工况要求。测量装置主要包括3个部分: 高精度的微小流量计、高清摄像机和消

收稿日期: 2015-11-05; 修订日期: 2015-11-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51376123)

作者简介: 张亮(1991-)男, 河北保定人, 上海交通大学硕士研究生。

光法激光测量仪器。

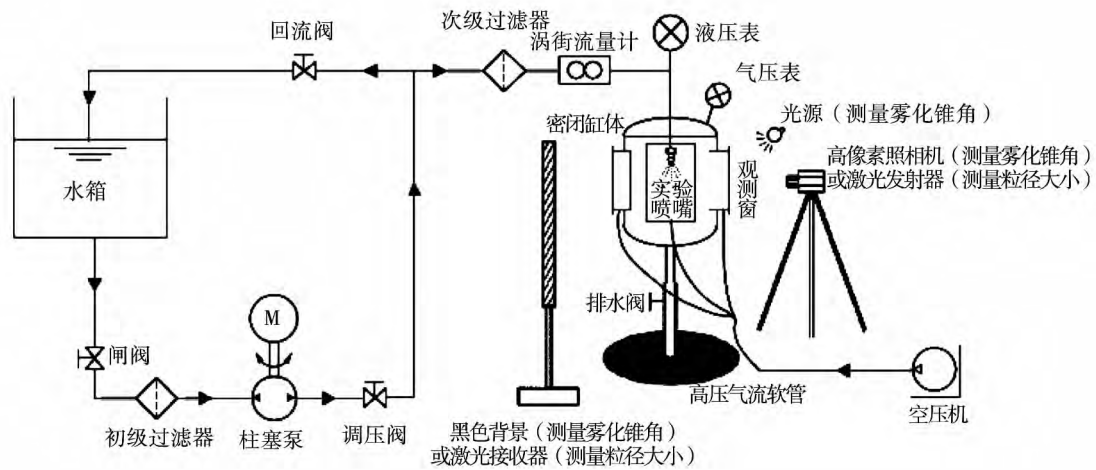


图 1 实验装置系统简图

Fig. 1 Experimental setup

的雾化锥部分;

## 2 实验测量方法

### 2.1 流量测量方法

本研究采用微小流量浮子流量计 (KN2X - C200) 对各实验工况分别进行 5 次测量, 通过求取平均值获得喷嘴流量数据。

### 2.2 雾化锥角测量方法

对于雾化锥角的测量方法主要有: 激光检测喷雾边缘法、直接量取法和基于 MATLAB (矩阵实验室) 平台的阈值法<sup>[6]</sup>。然而上述方法都存在很大的主观随意性, 这对锥角提取的科学准确性而言是一个重大的缺陷。主动轮廓法是目前最新的实现边界分离和提取的方法<sup>[7-8]</sup>。该方法从原理上能够确保所提取边界的唯一性, 能够保证提取结果的最佳可靠度。

图 2 为本实验通过高像素照相机对不同工况下的雾化过程进行拍摄所得到的典型雾化锥角图像。通过基于 MATLAB 平台的主动轮廓模型图像区域分离和边界提取技术对图像进行分析处理, 对各个工况进行多次拍摄测量, 求取平均值, 最终得到雾化锥角分布规律。

以一张喷雾图片的处理过程为例, 说明图片处理过程的主要步骤, 图像处理流程图如下图 3 所示。

(1) 对图像进行剪裁, 得到需要进行分析处理



图 2 典型喷雾图像

Fig. 2 Typical spray patterns

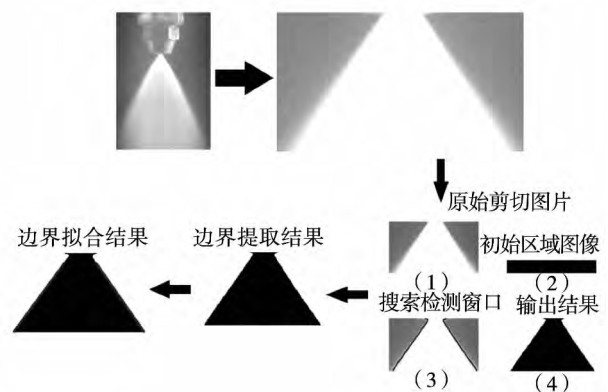


图 3 图像处理流程图

Fig. 3 The procedure of image processing

(2) 运用主动轮廓模型分割技术,经过足够多次数的迭代检索,对剪裁图像进行分割并提取图像边界;

(3) 基于 MATLAB 图像处理平台,将边界图像转化为二值图像,并运用最小二乘法拟合出锥角边界,求得雾化锥角。

### 2.3 粒径大小测量方法

目前针对喷雾粒径的测试技术以光学测量方法为主。主要的光学测量方法包括:激光干涉条纹光谱法、高速摄像法、激光衍射光强比法和马尔文法等。本研究采用研发的消光式粒径测量装置<sup>[2,9-10]</sup>对雾化粒径进行测量。该装置以光散射理论为基础,结合雾滴空间分布统计学规律,利用测量激光穿过雾滴空间后透射率的变化规律推算雾滴的 SMD (索太尔直径)。实验前利用 25.47 μm 的标准粒子对该装置进行校准,确保测量数据的准确性。

## 3 实验结果及分析

由于燃油的可燃易爆和不易清洁的特点,在喷嘴雾化研究过程中众多学者都采用水作为实验替代工质<sup>[11-12]</sup>。水和油之间的物性差别为黏度和表面张力,两者都是喷嘴雾化的不利条件,虽然水的粘性较煤油小,但水的表面张力比煤油大,因此在相同实验条件下两者雾化效果十分相似<sup>[12]</sup>。经过综合考量,本研究采用水作为实验替代工质。

### 3.1 流量特性

根据前人的研究成果可知,理论上单路压力喷嘴的流量与供油压差和喷嘴直径之间存在如下关联式:

$$\mu = \frac{q_v}{(\pi d_0^2/4)\sqrt{2\Delta p/\rho_0}}$$

式中:  $\mu$  —流量系数;  $q_v$  —体积流量,  $m^3/s$ ;  $d_0$  —喷嘴口直径,  $m$ ;  $\Delta P$  —供油压差(上位供油压力与喷嘴背压之间的差值),  $Pa$ ;  $\rho_0$  —燃油密度,  $kg/m^3$ 。

经过多次重复性实验,得到实验结果如图 4 所示,图中背压均为表压。运用最小二乘法对实验数据进行线性回归计算分析,得到实验喷嘴的流量系数为  $\mu = 0.26825$ 。

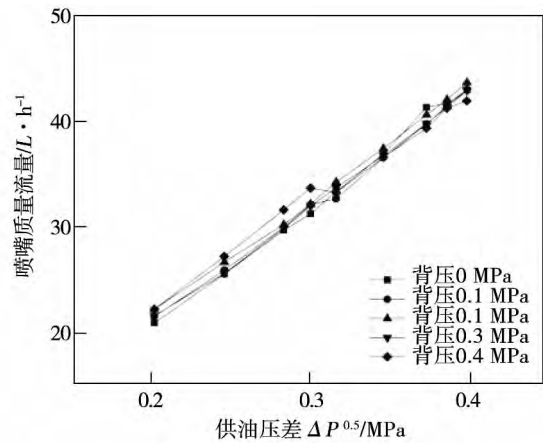


图 4 流量 - 压差特性曲线

Fig. 4 Flow characteristics of the nozzle

### 3.2 雾化锥角特性

采用主动轮廓法测量喷嘴雾化锥角,得到了雾化锥角随压差和背压的变化规律,分别如图 5、图 6 所示。压差和背压的变化都对雾化锥角有影响:在相同背压条件下,雾化锥角随压差的提高呈现先增大后减小的变化趋势,且变化幅度小于 1°;在同一压差条件下,随着背压在 0.1 ~ 0.4 MPa 范围内升高,雾化锥角呈现减小趋势,变化幅度约为 5°。并且随着背压的不断增大,锥角的减小速率不断减小,当背压大于 0.3 MPa 后,其对雾化锥角的影响就不再明显,最终锥角将稳定在 65°左右。其原因在于喷嘴自身结构参数也是决定锥角变化的重要因素。

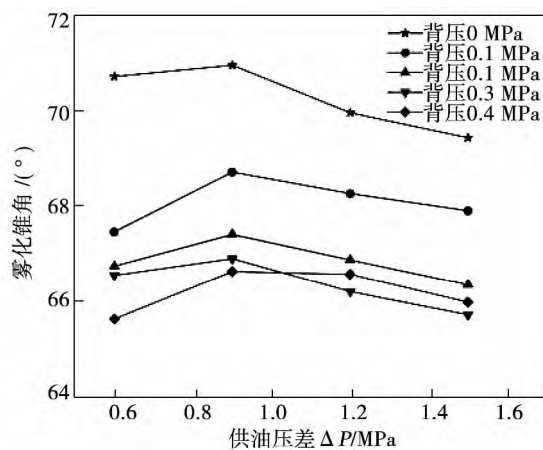


图 5 锥角 - 压差特性曲线

Fig. 5 Atomizing angles with different differential pressures

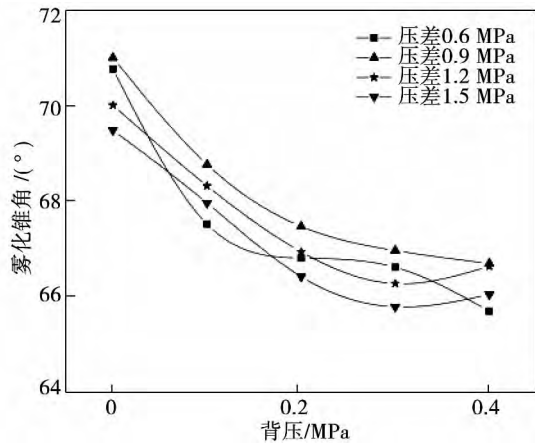


图 6 锥角 - 背压特性曲线

Fig. 6 Atomizing angles with different back pressures

### 3.3 粒径分布特性

本研究对喷嘴下游不同高度位置处的粒径大小进行测量,具体位置分布如图 7 所示。

在同一高度处,当压差为固定值时,雾化粒径随背压的变化规律如图 8 所示。实验结果表明:在离喷嘴较近处(5 mm),相同压差条件下,随背压的增大粒径从最高 87  $\mu\text{m}$  减小到 70  $\mu\text{m}$ ,约减小 20%;

随着距离喷嘴下游高度的增加(15 ~ 35 mm),相同压差下粒径随背压的增大呈现增大趋势。比较 Z5、Z6 两图可以看出,测量位置离喷嘴的距离达到 30 mm 后,各个工况下的粒径大小无明显变化,说明此处已经达到了稳定的雾化效果。实验还发现在低背压工况时,同一高度不同压差下的粒径大小变化显著;背压达到 0.4 MPa 时,在相同高度处压差变化对粒径大小无显著影响,粒径大小变化小于 5%。

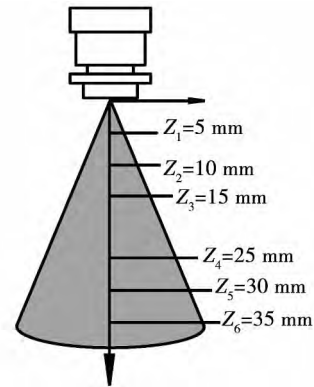


图 7 测量高度分布

Fig. 7 Positions of measurement points

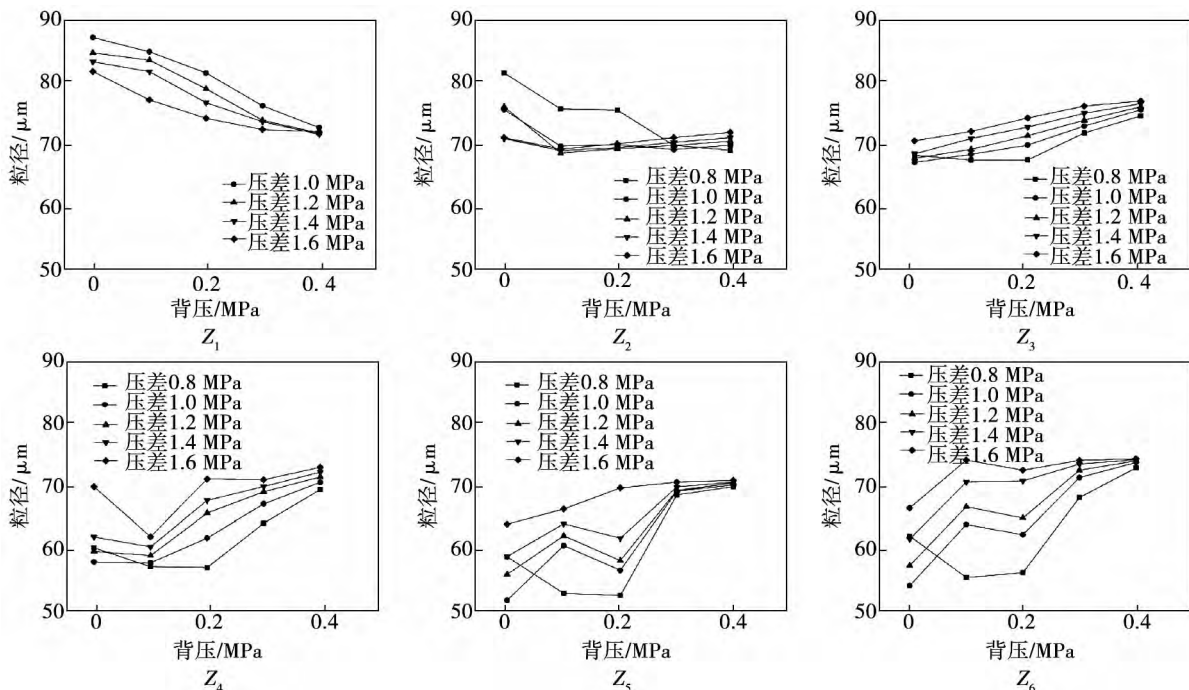


图 8 同一高度处不同背压下的雾化粒径

Fig. 8 Atomized particle sizes with different back pressures at the same distance

密闭缸体内部背压增加会导致其内部空气密度增大。空气密度越大,液体经由喷嘴以高速射入缸

内时空气对其作用力越大,使其更易分散破碎,因此在近喷口处背压越高粒径越小;由于空气密度越大,工质动能减小速度越快,使小液滴之间产生碰撞并聚合产生较大液滴的概率增加,因此离喷口距离在15~35 mm范围处,随背压的升高粒径呈增大趋势;当距离达到喷嘴的贯穿距离后,各工况下的粒径大小就无明显变化,说明在此处已经达到稳定的雾化效果,因此Z5、Z6两图中粒径大小分布十分相近。

#### 4 结 论

针对背压环境对喷嘴雾化特性的影响进行实验研究,从而获得如下结论:

(1) 通过对实验数据进行拟合计算,最终得到实验喷嘴的流量系数,背压环境对流量特性无显著影响;

(2) 在一定范围内背压变化对雾化锥角有明显影响。随背压升高,雾化角呈减小趋势,但当背压达到某一值(0.3 MPa)后,其影响不再明显,锥角趋于稳定值,变化幅度约为5°。雾化锥角随压差的提高呈现先增大后减小的变化趋势,且变化幅度较小;

(3) 在近喷口处,相同压差条件下,随背压的增大雾化粒径逐渐减小;当距离喷口较远时,相同压差下粒径随背压的增大呈现增大趋势。在同一高度处,低背压工况下不同压差下的粒径大小差异较为明显;当背压达到某一值(0.4 MPa)时,压差不再具有显著影响。

#### 参考文献:

[1] 曹建明. 喷雾学研究的国际进展[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2005, 25(1): 82-87.  
CAO Jian-ming. Review of international evolvement on spray investigation[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2005, 25(1): 82-87.

[2] 吴伟亮, 沈彦成, 钟 策. 横向往气流中喷雾粒径的变化规律[J]. 燃烧科学与技术, 2014, 20(6): 478-482.  
WU Wei-liang, SHEN Yan-cheng, ZHONG Ce. Size variation of atomizing droplet in cross flow[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2014, 20(6): 478-482.

[3] 刘锦涛, 王乐勤, 程 俊, 等. 轴流风速下旋流喷嘴的外流场实验研究[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2010, (6): 1160-1163.  
LIU Jin-tao, WANG Le-qin, CHENG Jun, et al. Experimental study of swirl nozzle's outer field with axial wind[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2010(6): 1160-1163.

[4] 李建昌, 李宏宇, 陈 建, 等. 喷嘴结构对真空喷射雾化性能影

响研究[J]. 真空科学与技术学报, 2014, 34(2).

LI Jian-chang, LI Hong-yu, CHEN Jian, et al. Effect of nozzle structure on jet flow atomization in vacuum spray[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2014, 34(2).

[5] O'Rourke P J, Amsden A A. The TAB method for numerical calculation of spray droplet breakup [R]. SAE Technical Paper, 1987.

[6] 谭 伟, 姚锡凡, 王 斌, 等. 基于 MATLAB 的电控喷油器雾化角测量 [C] [C]//第十五届全国图象图形学学术会议论文集, 2010.  
TAN Wei, YAO Xi-fan, WANG Bin, et al. A Measuring method for the atomization angle of electronic-controlled injector based on MATLAB[C]. Proceedings of the Fifteenth National Conference on Image and Graphics, 2010.

[7] 曾青华, 范慧杰, 王 岳, 等. 基于主动轮廓方法提取雾化锥角 [J]. 航空动力学报, 2014, 29(2): 284-289.  
ZENG Qing-hua, FAN Hui-jie, WANG Yue, et al. Spray angle tracking based on active contour method[J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29(2): 284-289.

[8] Kass M, Witkin A, Terzopoulos D. Snakes: Active contour models [J]. International journal of computer vision, 1988, 1(4): 321-331.

[9] 吴伟亮, 陈汉平, 金 浩, 等. 新型喷雾光学测量仪的研制 [J]. 热能动力工程, 2004, 18(6): 623-626.  
WU Wei-liang, CHEN Han-ping, JIN Hao, et al. The development of a new type of spray optical measuring instrument[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2004, 18(6): 623-626.

[10] 吴伟亮, 蔡小舒. 应用激光透射信号随机波动特性求取颗粒尺寸及浓度 [J]. 上海理工大学学报, 1999, 21(2): 177-179.  
WU Wei-liang, CAI Xiao-shu. A method to calculate the particle size and concentration with laser fluctuation characteristics [J]. University of Shanghai for Science and Technology, 1999, 21(2): 177-179.

[11] 杨立军, 葛明和, 张向阳, 等. 喷口长度对离心喷嘴雾化特性的影响 [J]. 推进技术, 2005, 26(3): 209-214.  
YANG Li-jun, GE Ming-he, ZHANG Xiang-yang, et al. Effects of spout length on spray characteristic of swirl injector[J]. Journal of Propulsion Technology, 2005, 26(3): 209-214.

[12] 张 征, 樊未军, 杨茂林. 双路离心式喷嘴雾化特性研究 [J]. 工程热物理学报, 2003, 24(1): 153-156.  
ZHANG Zheng, FAN Wei-jun, YANG Mao-lin. Research on dual centrifugal nozzle atomization characteristics[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2003, 24(1): 153-156.

(姜雪梅 编辑)

flow field ,which is the main reason causing combustion instabilities. **Key words:** swirl stabilized flame ,partially premixed ,combustion instabilities ,large eddy simulation ,vortex-flame interactions ,Rayleigh index

背压环境下压力喷嘴雾化特性实验研究 = **Experimental Study on the Atomization Characteristics of Pressure Nozzle** [刊 汉]ZHANG Liang ,LU Zhen-hua ( Shanghai Jiaotong University Key Laboratory for Power Machinery and Engineering of Ministry of Education ,Shanghai ,China ,Post Code: 200240) ,Liu Yu-feng ( Systems Engineering Research Institute ,Beijing ,China ,Post Code: 100036) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016 31(4) . -74 ~78

In this paper a test facility is designed such that it can provide a stable backpressure for the spray nozzle and is also equipped with the data collection and measurement system. And a study on the spray atomization characteristics of a pressure nozzle is performed by using this test facility. The nozzle flow coefficient is obtained with a flow meter. The experimental results show that the atomization angle will decrease when the backpressure increases and eventually approaches a stable value. Near the nozzle ,the diameter of droplets decreases with the backpressure under the same pressure difference. Away from the nozzle ,the droplet diameter increases with the backpressure. With the backpressure less than 3 bar ,the average droplet diameter changes evidently with pressure difference. However ,the droplet diameter change is not remarkable with pressure difference when it reaches 4 bar. **Key words:** backpressure ,pressure difference ,mass flow ,atomization angle ,average diameter

CFB 锅炉掺烧高钙煤矸石自脱硫性能试验研究 = **Experimental Study on Self-desulfurization Performance of Blending the Gangue Coal with High Calcium in CFB Boiler** [刊 汉]LIU Bo ,ZHENG Wen-guang ,ZHANG Xin ( China Huadian Electric Power Research Institute ,Hangzhou ,China ,Post Code: 310030) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016 31(4) . -79 ~83

Experimental study on the self-desulfurization performance of gangue coal mixed with different proportions and the desulfurization performance in conditions of furnace sorbent injection was carried out by a power plant to investigate