

旋流式气液同轴式喷油器在加压空间中 流量特性的试验研究

王永堂¹ 陈 明² 吴少华¹ 杜晓建²

(1. 哈尔滨工业大学 能源科学与工程学院 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 中国船舶重工集团公司第七〇三研究所 黑龙江 哈尔滨 150078)

摘 要: 在增压条件下对一种旋流式气液同轴喷油器的流量特性进行试验研究。在不同的环境背压条件下,分别研究了气液比、环境背压对燃油流量系数、雾化空气流量系数的影响。结果表明:本喷油器的燃油流量系数稳定在 0.2971,不受气液比、环境背压等因素的影响;雾化空气流量系数随环境背压与喷油器雾化空气通道进口压力的压力比的增大而减小,与气液比无关。根据试验数据整理出雾化空气流量系数拟合公式,能够对试验数据作出准确的预测。

关 键 词: 旋流式气液同轴喷油器; 加压空间; 燃油流量系数; 空气流量系数; 拟合公式

中图分类号: TK223. 2 文献标识码: A

引 言

气液同轴式喷油器作为增压锅炉的关键设备之一,其流量系数影响喷入增压锅炉的燃油流量,进而影响增压锅炉的混合比与燃烧过程,从而对增压锅炉的性能产生重要作用,因此开展气液同轴式喷油器的流量特性研究具有重要的理论意义和工程应用价值^[1]。

目前,国内外对气液同轴式喷油器的研究主要集中于在航空发动机、制药以及水煤浆气化等领域。但大多数的研究多集中于雾化性能和机理的研究^[2~7]。国内曾广泛开展了同轴直流式、同轴离心式、三组元式气液喷嘴的流量特性的研究^[8~15],但主要都是研究在常压条件下,喷嘴的结构形式或其关键尺寸对流量特性的影响。

本研究开展了气液同轴式喷油器在增压条件下的流量特性试验,通过对喷油器影响因素的理论分析及试验数据的拟合处理,得出了气液同轴式喷油器在增压条件下的辅助雾化空气的流量系数公式。

1 旋流式气液同轴喷油器及试验系统

旋流式气液同轴喷油器如图 1 所示,由挡板、雾化片、压紧螺母以及多孔分油板组成。

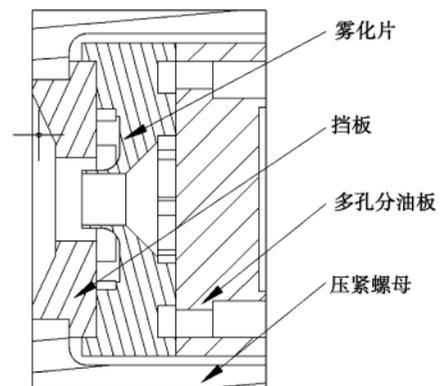


图 1 旋流式气液同轴喷油器

Fig. 1 Swirling flow type gas-liquid co-axial oil sprayer

雾化片具有双面旋流切向槽:燃油切向槽和雾化空气切向槽。燃油从一个内腔经多孔的燃油分流板进入雾化片的燃油切线槽,从喷口喷出。空气从另一个内腔进入雾化片的空气切向槽,从雾化片与挡板形成的环状间隙喷出;最后燃油和雾化空气的混合物从喷口喷出,形成一个锥形的雾化体。由于受到气动力的作用,可以保证有良好的雾化效果。

本试验在常温增压的条件下进行,试验装置的系统图试验台架的照片如图 2 和图 3 所示。试验过程中先将雾化空气压力以及环境背压调节到规定值,然后通过调节阀调整油压,待雾化空气压力、环境背压以及喷油器前油压稳定后,用专门的涡轮流

量计分别测量雾化空气的供气量以及液体燃油的流量。

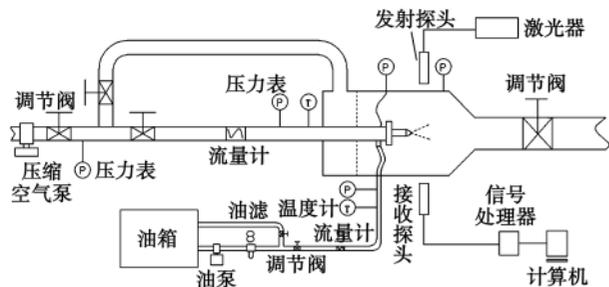


图 2 试验装置系统图

Fig. 2 Systematic diagram of the test device

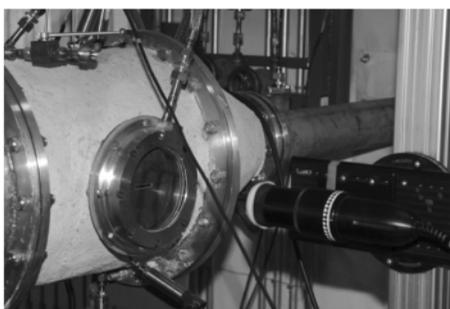


图 3 试验装置照片

Fig. 3 Photo of the test device

试验用的仪器仪表都经过专门的标定, 测量范围与精度如表 1 所示:

表 1 测量范围及精度

Tab. 1 Measurement range and precision

	精度	测量范围
压力变送器	0.25%	0 ~ 800 kPa
铂电阻	B 级	0 ~ 100 °C
气体涡轮流量计	1.5%	2 ~ 11 L/s
液体涡轮流量计	1%	55 ~ 333 mL/s
粒径测量	1%	1 ~ 800 μm

本试验所用介质为 RP3 型航空煤油, 煤油的密度为 802 kg/m³ 粘性为 1.25 mm²/s(温度: 20°C)。

本试验的范围为: 雾化空气压力 100 ~ 200 kPa; 燃油压力 100 ~ 450 kPa; 燃油流量为 100 ~ 200 mL/s; 环境背压为 50 ~ 150 kPa, 试验中所有压力值均为表压; 雾化空气压力用 P_a 表示, 单位为 kPa; 环境背压用 P_e 表示, 单位为 kPa; 燃油压力用 P₁ 表示, 单位为 kPa; 燃油流量用 Q₁ 表示, 单位为 mL/s。

2 流量系数表达式

喷油器的流量特性是指在一定的背压条件下, 喷嘴压降与流量的关系, 流量特性试验是通过试验的方法测量喷嘴的进口压力、环境背压和喷嘴流量, 通过流量公式确定喷嘴的流量系数。

根据伯努利方程, 不可压缩燃油的流量可以表示如下的关系:

$$Q_1 = C_1 A_1 \sqrt{2\rho_1 \Delta P_1} \quad (1)$$

式中: Q₁—燃油的流量, kg/s; C₁—燃油的流量系数; A₁—喷嘴液相出口面积, m²; ρ₁—被测燃油的密度, kg/m³; ΔP₁—被测燃油在喷嘴进出口的压力差, Pa。

此时流量系数可以表达为:

$$C_1 = \frac{Q_1}{A_1 \sqrt{2\rho_1 \Delta P_1}} \quad (2)$$

雾化气体的流量系数用等熵方程来计算。设环境背压 P_e 与雾化喷嘴入口压力 P_a 之比 δ = P_e/P_a, 气流流量最大时的压力比就是临界压力比:

$$\delta_c = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} \quad (3)$$

对于空气, 比热比 k = 1.4, 气体常数 R = 287.1 J/(kg · K); δ_c = 0.5283。

在亚临界状态下, δ_c < δ ≤ 1, 气体流量按下式计算:

$$Q_g = \frac{C_g P_a A_g}{\sqrt{RT_a}} \sqrt{\frac{2k}{k-1} \left[\left(\frac{P_g}{P_a} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P_g}{P_a} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]} \quad (4)$$

$$C_g = \frac{Q_g \sqrt{RT_a}}{P_a A_g} \sqrt{\frac{2k}{k-1} \left[\left(\frac{P_g}{P_a} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P_g}{P_a} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]} \quad (5)$$

在超临界状态下 δ < δ_c, 气体流量按下式计算:

$$Q_g = C_g P_a A_1 \sqrt{\frac{k}{RT_a} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k-1}{k}}} \quad (6)$$

其中 Q_g 为辅助雾化空气的流量; P_a 指气体的总压, 当忽略气体在入口处的动压时 P_a 等于气体在喷嘴入口处的静压; T_a 指气体的总温; A_g 和 A₁ 分别为喷嘴出口处气相的流通面积和喷嘴喉部的气相流通面积, 而:

$$C_g = Q_g / \left(P_a A_1 \sqrt{\frac{k}{RT_a} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k-1}{k}}} \right) \quad (7)$$

利用上述的流量公式处理试验数据, 计算相应的流量系数。本试验所进行的工况点及相应的流量系数如表 2 所示。

表 2 试验的工况点及流量系数值

Tab.2 Operating condition points and flow coefficient value

P_1 /kPa	P_a /kPa	P_c /kPa	C_1	C_g
125	100	50	0.2973	0.4349
162	100	50	0.2912	0.4349
202	100	50	0.2919	0.4355
245	100	50	0.2946	0.4345
295	100	50	0.2960	0.4357
357	100	50	0.2933	0.4342
210	150	100	0.2940	0.4318
250	150	100	0.2938	0.4322
295	150	100	0.2946	0.4320
350	150	100	0.2930	0.4320
400	150	100	0.2968	0.4313
135	100	60	0.2973	0.4312
232	100	60	0.2942	0.4296
360	100	60	0.2968	0.4335
142	100	67	0.2973	0.4220
235	100	67	0.2976	0.4201
159	150	88	0.3055	0.4497
258	150	88	0.2958	0.4499
390	150	88	0.2957	0.4499
183	150	108	0.2973	0.4234
281	150	108	0.2934	0.4277
416	150	108	0.2929	0.4317
269	200	98	0.2950	0.4946
399	200	98	0.2964	0.4891
196	200	125	0.3055	0.4579
295	200	125	0.2958	0.4560
217	200	140	0.2934	0.4343
310	200	140	0.2958	0.4316
444	200	140	0.2948	0.4361
226	200	150	0.2952	0.4304
321	200	150	0.2950	0.4275
450	200	150	0.2968	0.4261
221	100	50	0.2950	0.4370
175	165	100	0.2973	0.4535
175	180	100	0.2973	0.4666
173	200	100	0.3014	0.4783
74	100	0	0.2992	0.5732
172	100	0	0.2942	0.5830

3 试验的结果和分析

3.1 燃油流量系数

3.1.1 气液比对燃油流量系数的影响

环境背压为 100 kPa 的条件下,改变雾化空气压力即雾化空气流量以确定气液比对燃油流量系数的影响,如图 4 所示。从图 4 可知燃油的流量系数都在 0.3 左右,雾化空气流量的变化即气液比对燃油流量系数没有影响。分析原因可知,由于雾化燃油可认为是不可压缩的流体,其流量特性由喷油器的燃油通道的结构所决定,当气液比在 0.06 - 0.12 的范围内变化时,雾化空气对雾化燃油的影响可以忽略不计。

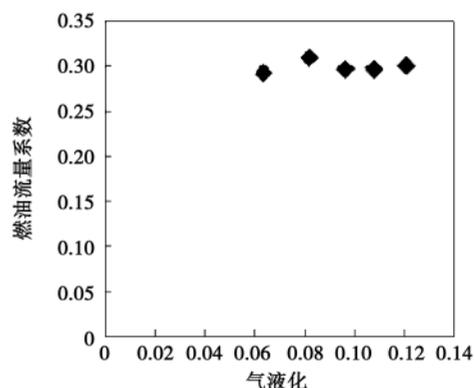


图 4 气液比对燃油流量系数的影响

Fig.4 Influence of the gas/liquid ratio on the flow coefficient of the fuel oil

3.1.2 环境背压对燃油流量系数的影响

在保证燃油流量一定的条件下,环境背压的改变对燃油流量系数的影响如图 5 ~ 图 7 所示。由图可以看出,燃油流量从 100 mL/s 变化至 200 mL/s 时,环境背压对燃油流量系数没有影响,燃油流量系数都约为 0.2971。分析原因可知,当喷油器结构一定时,其雾化燃油通道的阻力系数就确定且保持不变,因此其流量特性不随环境背压的变化而改变。

通过图 5 ~ 7 可以看出本喷油器的燃油流量系数不随雾化空气流量即气液比以及环境背压的影响,基本稳定在 0.2971 左右,对所做的所有工况点的燃油流量系数进行算术平均可得其平均值为 0.2971,所有工况的平均误差为 0.24%,最大误差为 2.82%。考虑到燃油和雾化空气的稳定性以及试验测量仪器的精度误差,可以认为本喷油器的燃油流量系数为 0.2971,并且其值由雾化器部内部燃油通

道结构所决定 不受外界条件的影响而改变。

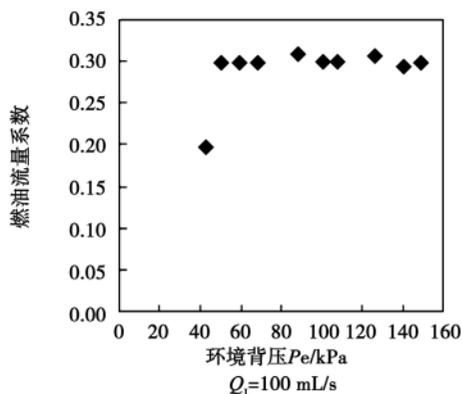


图 5 $Q_1 = 100$ mL/s 环境背压的影响

Fig. 5 Influence of the environmental back pressure when $Q_1 = 100$ mL/s

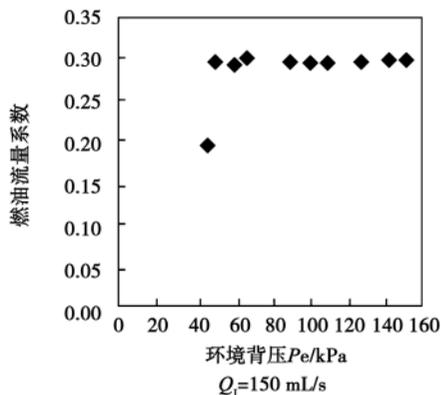


图 6 $Q_1 = 150$ mL/s 环境背压的影响

Fig. 6 Influence of the environmental back pressure when $Q_1 = 150$ mL/s

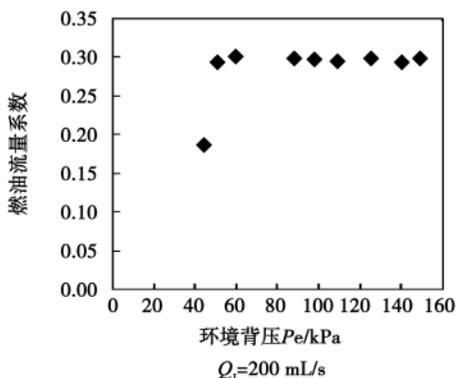


图 7 $Q_1 = 200$ mL/s 环境背压的影响

Fig. 7 Influence of the environmental back pressure when $Q_1 = 200$ mL/s

3.2 雾化气体流量系数

3.2.1 气液比对雾化空气流量系数的影响

在保证雾化空气压力以及环境背压一定的条件下 改变燃油压力以改变燃油流量即气液比对雾化空气流量系数的影响如图 8 和图 9 所示。

从图 8 和图 9 可以看出 燃油流量的变化即气液比的变化对雾化空气流量系数没有影响。分析其原因可知 从雾化空气流量的等熵方程 (4) 和 (6) 可知 其流量主要取决于喷油器前后的压力比以及喷油器出口气相的流通面积 在雾化空气压力以及环境背压一定的条件下 辅助雾化空气进出口的压力比保持不变; 当燃油流量的改变所导致气液比从 0.03 ~ 0.08 变化时 此时燃油对雾化空气的影响可忽略不计 因此雾化空气的流量系数保持不变。

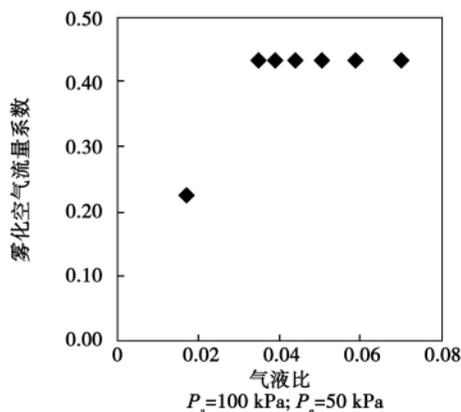


图 8 气液比对雾化空气流量系数的影响

Fig. 8 Influence of the gas-liquid ratio on the atomized air flow coefficient

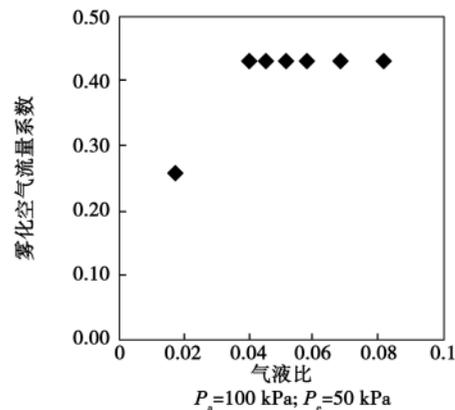


图 9 气液比对雾化空气流量系数的影响

Fig. 9 Influence of the gas-liquid ratio on the atomized air flow coefficient

3.2.2 压力比对雾化空气流量系数的影响

喷油器出口的环境背压与入口雾化空气压力的压力比对辅助雾化空气流量系数的影响如图 10 所示。从图 10 可知,在亚临界的状态下,随着压力比的增大,其雾化空气的流量系数随之减小。

3.2.3 雾化空气流量系数的公式拟合

一般认为,造成喷油器损失的主要因素是喷油器内流体的流动状态。选取喷嘴中辅助雾化空气的 Re 数和压力比 δ 为参数,选用最小二乘法对喷嘴内的气相流量系数进行公式拟合,得到的喷油器辅助雾化空气的流量系数为:

$$C_g = 0.2Re^{0.06}\delta^{-0.64} \quad (8)$$

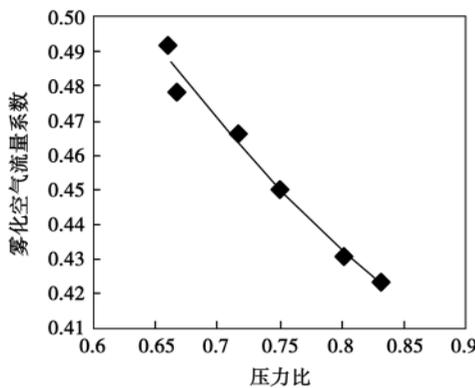


图 10 压力比对雾化空气流量系数的影响
Fig. 10 Influence of the pressure ratio on the atomized air flow coefficient

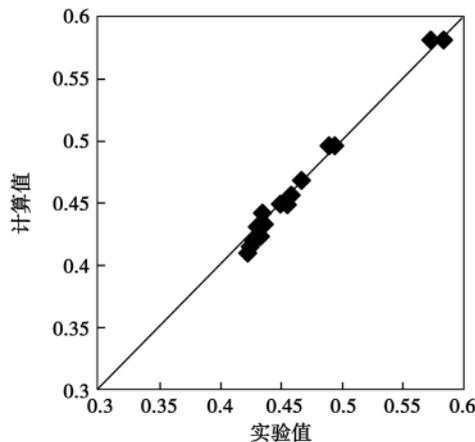


图 11 空气流量系数计算值与实验值的对比
Fig. 11 Contrast of the calculated values and test ones of the air flow coefficients

将喷油器的流量参数代入式(8),得到拟合的喷油器雾化空气流量系数的计算值,与通过试验及式(5)所得到的雾化空气流量系数的试验值相比较

可知,辅助雾化空气流量系数的计算值与试验值的平均误差为 1.17%,最大误差为 3.47%,如图 11 所示。考虑雾化空气的稳定性以及相应的试验测量仪器的精度误差,说明式(8)的拟合精度较高。

4 结 论

对增压锅炉旋流式气液同轴喷油器在加压环境下的流量系数进行试验研究,得出结论如下:

(1) 喷油器的燃油流量系数不受气液比、环境背压等外界因素的影响,其值为 0.2971,从试验结果看,平均误差为 0.24%,最大误差为 2.82%。

(2) 喷油器的辅助雾化空气的流量系数主要受其自身的流动状态的影响,采用雷诺数 Re 和压力比 δ 为参数,以试验数据为基础,选用最小二乘法对喷油器内的气相流量系数进行公式拟合,得到的喷油器辅助雾化空气的流量系数为:

$$C_g = 0.2Re^{0.06}\delta^{-0.64}$$

辅助雾化空气流量系数的计算值与试验值的平均误差为 1.17%,最大误差为 3.47%,说明拟合的精度较高。

参考文献:

[1] 王建志,王永堂,吴少华,等.船用增压锅炉旋流蒸汽机械喷油器的雾化特性[J].热能动力工程,2007,22(3):306-309.
WANG Jian-zhi, WANG Yong-tang, WU Shao-hua, et al. Atomization characteristics of a swirling flow steam mechanical oil sprayer in a marine supercharged boiler[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2007, 22(3): 306-309.

[2] 栗涛,许建良,李伟锋,等.同轴双通道喷嘴雾化滴径沿轴向分布特性[J].化工学报,2009,60(4):886-891.
LI Tao, XU Jian-liang, LI Wei-feng, et al. Distribution characteristics of the atomized particle diameters of a co-axial dual channel nozzle along the axial direction[J]. Journal of Chemical Industry, 2009, 60(4): 886-891.

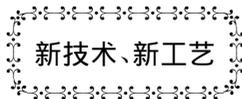
[3] 李波,黄镇宇,杜聪,等.三通道气力式喷嘴加压环境雾化特性试验研究[J].能源工程,2010,2:14-19.
LI Bo, HUANG Zhen-yu, DU Chong, et al. Experimental study of the atomization characteristics of a three-way pneumatic nozzle in a pressurized environment[J]. Energy Source Engineering, 2010, 2: 14-19.

[4] Aliseda A, Hopfinger E J, Lasheras J C, et al. Atomization of viscous and non-newtonian liquids by a coaxial, high-velocity gas jet experiments and droplet size modeling[J]. Int J Multiphase Flow, 2008, 34(2): 161-175

[5] 刘海峰,李伟锋,陈谋志,等.大液气质量流量比双通道气流式喷嘴雾化滴径[J].化工学报,2005,56(8):1462-1466.
LIU Hai-feng, LI Wei-feng, CHEN Mou-zhi, et al. Atomized parti-

- cle diameters of a dual passage air flow type nozzle with a large liquid/air mass flow rate ratio [J]. Journal of chemical industry, 2005, 56(8): 1462 - 1466.
- [6] Hongsuk K, Nakwon S. The effect of ambient pressure on the evaporation of a single droplet and a spray [J]. Combustion and Flame 2003, 135: 261 - 270.
- [7] Dong J K, Jih I. Effect of ambient gas density on spray characteristics of swirling liquid sheets [J]. Journal of Propulsion and Power 2007, 23(3): 603 - 611.
- [8] 龚景松, 傅维铤. 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.
- [9] 赵子通, 周俊虎. 空气雾化水煤浆喷嘴流量特性试验研究 [J]. 能源工程 2010(2): 1 - 5.
ZHAO Zi-tong, ZHOU Jun-hu. Experimental study of the flow characteristics of an air atomization coal slurry nozzle [J]. Energy source engineering 2010(2): 1 - 5.
- [10] 孙纪国. 氢氧同轴式喷嘴流量特性试验和理论分析 [J]. 航空动力学报 2005, 20(4): 689 - 692.
SUN Ji-guo. Test and theoretical analysis of the flow characteristics of a hydrogen-oxygen coaxial type nozzle [J]. Journal of Aerospace Power 2005, 20(4): 689 - 692.
- [11] 李丹琳, 栾叶君, 孙纪国. 液氧/甲烷气液喷注器试验研究 [J]. 火箭推进 2010, 36(4): 59 - 62.
- LI Dan-lin, LUAN Ye-jun, SUN Ji-guo. Experimental study of liquefied oxygen/methane gas-liquid spraying injector [J]. Rocket Propulsion 2010, 36(4): 59 - 62.
- [12] 孙纪国, 庄逢辰, 王 珺. 缩进深度对同轴式喷嘴流量特性的影响 [J]. 火箭推进 2003, 24(5): 452 - 455.
SUN Ji-guo, ZHUANG Feng-chen, WANG Yu. Influence of the retracted depth on the flow characteristics of a co-axial type nozzle [J]. Rocket Propulsion 2003, 24(5): 452 - 455.
- [13] 周 进, 胡小平, 黄玉辉, 等. 氢氧发动机气液同轴式喷嘴流量特性研究 [J]. 航空动力学报, 1996, 11(4): 397 - 400.
ZHOU Jin, HU Xiao-ping, HUANG Yu-hui, et al. Study of the flow characteristics of a gas/liquid co-axial type nozzle destined for hydrogen-oxygen engines [J]. Journal of Aerospace Power, 1996, 11(4): 397 - 400.
- [14] 张蒙正, 李 鳌, 李进贤, 等. 气/液同轴离心式喷嘴流量及雾化特性实验 [J]. 推进技术 2004, 25(1): 19 - 22.
ZHANG Meng-zheng, LI Ao, LI Jin-xian, et al. Flow and atomization characteristic test of a gas/liquid co-axial centrifugal type nozzle [J]. Propulsion Technology 2004, 25(1): 19 - 22.
- [15] 周 进, 童荣瑜, 沈赤兵, 等. 不同结构形式气液同轴式喷嘴的流量特性 [J]. 国防科技大学学报, 1999, 21(5): 1 - 4.
ZHOU Jin, TONG Rong-yu, SHEN Chi-bing, et al. Flow characteristics of a gas/liquid coaxial type nozzle in various forms of structure [J]. Journal of University of National Defence Sciences, 1999, 21(5): 1 - 4.

(陈 滨 编辑)



汽轮机低压缸端部密封结构和系统的改进措施

据《Электрические станции》2011 年 4 月刊报道, 俄罗斯 ЦКТИ(中央锅炉涡轮机研究所)的专家深入研究了汽轮机低压缸端部密封的结构和系统。

分析了汽轮机低压缸端部密封结构和系统在运行的缺陷和不足, 这些缺点将导致滑油和蒸汽被吸入通流部分并使真空恶化。

详细探讨了导致滑油和蒸汽被吸入的结构问题并提出了改进措施。

在斯摩陵斯克发电厂 2 号机组的 K - 200 - 130 汽轮机低压缸上采用了这些改进措施。应用结果表明, 可以使空气吸入量减少 40% ~ 70%, 真空度增加 0.3% ~ 0.4%。

(吉桂明 摘译)

structure, the heat lost can be effectively recovered, making the micro-burner have a good heat performance. It has been proven that the porous medium heat recuperation micro-burner thus designed is regarded as one with a high combustion efficiency and a low heat loss rate. **Key words:** porous medium heat recuperation micro-burner, premixed combustion, heat loss, numerical simulation

旋流式气液同轴式喷油器在加压空间中流量特性的试验研究 = **Experimental Study of the Flow Rate Characteristics of a Swirling Flow Type Gas-liquid Coaxial Oil Sprayer in a Pressurized Space** [刊, 汉] WANG Yong-tang, WU Shao-hua (College of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001), CHEN Ming, DU Xiao-jian (CSIC Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2012 27(2). - 212 ~ 217

Under the pressurization condition, experimentally studied were the flow rate characteristics of a swirling flow type gas-liquid coaxial oil sprayer. At a variety of ambient back pressures, the influence of the gas/liquid ratio and ambient back pressure on the fuel oil flow coefficient and atomization air flow coefficient was investigated respectively. The research results show that the sprayer under discussion can have a stable fuel oil flow coefficient of 0.2971, not influenced by gas/liquid ratio and ambient back pressure etc. factors. The atomization air flow coefficient will decrease with an increase of the pressure ratio of the ambient back pressure and the pressure at the inlet of the atomization air passage of the oil sprayer, independent of the gas/liquid ratio. On the basis of the test data, a fitting formula of the atomization air flow coefficient can be obtained, which can accurately predict any test datum. **Key words:** swirling flow type gas-liquid coaxial oil sprayer, pressurized space, fuel oil flow coefficient, excess air ratio, fitting formula

滚筒式冷渣器灰渣运动实验与模拟 = **Experimental and Simulation Study of the Ash and Slag Movement in a Roller Type Slag Cooler** [刊, 汉] ZHUANG Yu (Shanghai Electrical and Power Plant Group Engineering Company, Shanghai, China, Post Code: 201199), CHEN Han-ping, WANG Xian-hua, ZHANG Shi-hong (National Key Laboratory on Coal Combustion, Central China University of Science and Technology, Wuhan, China, Post Code: 430074) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2012 27(2). - 218 ~ 221

Through a movement test of slag inside a roller slag cooler, established was an axial movement model inside the roller and studied was the influence of the rotating speed, inclination angle, filling-up degree and diameter of the roller on the mean residence time of the slag. It has been found that in the rolling-down state, the residence time of the slag in the roller is about 1.5 times of that in the sliding movement state and the ash and slag are well mixed. Under the condition that other conditions are kept unchanged, the residence time of the ash and slag in the roller will