

弹簧喷嘴雾化性能试验研究

吴开奇, 袁益超, 黄燕, 袁健

(上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093)

摘要: 对弹簧喷嘴进行了雾化性能试验研究, 结果表明, 射流一开始呈连续的液膜, 然后液膜破裂成液线及最终的液滴; 随着负荷的增加, 弹簧喷嘴雾化锥角逐渐增大; 在额定负荷下, 弹簧喷嘴的雾化对称性和雾化液滴粒径平均分布情况都较为良好; 随着负荷的增加, 弹簧喷嘴雾化液滴的索太尔直径、最小直径和最大直径都逐渐增大。

关键词: 弹簧喷嘴; 雾化性能; 索太尔直径
中图分类号: TK 263.4 **文献标志码:** A

Experimental Study on Atomization Performance of the Spring Nozzle

WU Kai-qi, YUAN Yi-chao, HUANG Yan, YUAN Jian

(School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Spring nozzle is widely used in deaerator, however, its atomization performance significantly affects the heat and mass transfer rate. The atomization formed by the spring nozzle was studied. The results show that: the jet at the beginning is a continuous liquid film, then the liquid film breaks into liquid lines and droplets and the cone angle of nozzle spray will gradually increases as the load of the nozzle increases. When the spring nozzle is under rated load, the atomization symmetry is good and the spray droplet size distribution is also fine. As the load increases, the Sauter diameter, minimum diameter and maximum diameter of atomized droplets will gradually increase.

Key words: spring nozzle; atomization performance; Sauter diameter

雾化技术被广泛应用于工农业生产、交通运输及人们日常生活等各个领域^[1]。目前火电机组向大容量、高参数的方向发展, 要求机组系统尽可能地减少压力损失。除氧器的滑压运行能够在一定程度上减少部分压力损失, 因此, 我国 200 MW 及以上机组

一般都采用除氧器滑压运行方式^[2]。应用于滑压除氧器的最重要的部件即是弹簧喷嘴, 其能够适应机组各种负荷变化。弹簧喷嘴的雾化性能直接影响除氧器的运行性能, 对其喷雾机理与雾化质量进行研究是十分必要的。

收稿日期: 2013-04-10

第一作者: 吴开奇(1987-), 男, 硕士研究生。研究方向: 节能技术。E-mail: wukaiqi628@163.com

通讯作者: 袁益超(1965-), 男, 教授。研究方向: 节能技术。E-mail: ychyuan@163.com

目前世界上对液体雾化的研究基本可分为对机理的研究和对雾化性能的研究这两个方面. 对于液体雾化机理, 国外的研究较多. Hasson 等^[3-4]研究了扇形喷嘴当层流液体射入蒸汽中时蒸汽的凝结情况, 以及蒸汽中空气含量、蒸汽压力对传热系数的影响; Lee 等^[5-6]研究了阀型喷嘴和旋转雾化喷嘴在空气和蒸汽中的雾化性能. 国内对于液态的雾化性能研究居多, 例如, 解茂昭等^[7-9]针对环状液膜与高速射流进行了研究. 国内对于弹簧喷嘴的试验研究主要是研究压差对流量的影响, 并用于指导实际应用^[10-11]. 所以, 对于弹簧喷嘴雾化性能的研究是很有意义的.

1 弹簧喷嘴

弹簧喷嘴由芯轴、弹簧限位块、弹簧、阀瓣及阀座等组成, 如图 1 所示. 弹簧喷嘴喷出的水呈膜状. 当负荷变动即水量变动时, 喷嘴前后的压差会发生变化, 此压差作用在弹簧上, 弹簧的伸缩作用使喷口的面积随之发生变动, 保持出口水流速度基本不变, 维持良好的水流成膜性. 所以, 弹簧喷嘴能适应任何负荷的变化, 特别是低负荷时更显示出其优越性.

弹簧喷嘴一般安装在除氧器凝结水水室, 喷嘴前后的压差取决于水室和雾化区的压力. 在压差作用下, 雾化片与喷嘴法兰之间产生间隙, 凝结水从间隙中喷出, 形成极薄的空心锥形水膜裙, 继而雾化成小液滴.

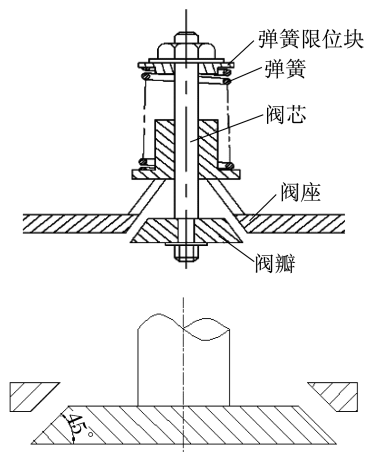


图1 弹簧喷嘴结构示意图

Fig.1 Schematic structures of spring nozzle

弹簧喷嘴的阀瓣开启方式有平喷和成一定角度喷射, 形成的液膜也具有不同的形状. 凝结水经平喷喷嘴射出后成水平抛物线状散落, 成一定角度的喷

口, 如 45°角, 喷射液膜形状则为空心锥形. 本文所研究的弹簧喷嘴为 45°喷口结构, 如图 1 所示.

2 试验系统

2.1 试验系统介绍

以一体化除氧器采用的弹簧喷嘴为研究对象, 试验系统如图 2 所示, 主要包括试验水箱、给水系统、弹簧喷嘴及测量系统等.

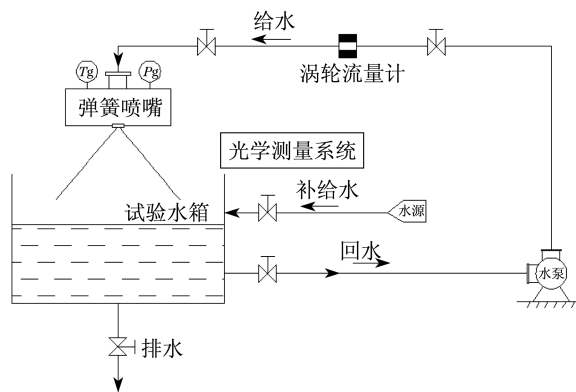


图2 试验系统图

Fig.2 Experiment system

2.2 试验测量系统

给水温度由精度为 A 级的 PT100 铂电阻测量. 弹簧喷嘴喷射压力由精度为 0.2 级的 EJA430 型压力变送器测量, 测量范围 0~0.6 MPa. 给水流量由精度为 0.2% 的 LWGY-40B 型涡轮流量计测量, 测量范围 3~20 m³/h.

试验的光学测量系统用来测量弹簧喷嘴雾化水滴的大小及分布情况, 采用图像测量方法, 由图像采集系统采集喷雾水滴图像, 并存储在计算机上进行分析和处理. 图像采集系统主要包括相机 (UI-5240SE)、镜头 (NAVITAR Zoom 6000 变焦镜头, 焦距 0.7~4.0 mm 连续可调, 工作距离 356 mm, 10 W 的 LED 光源以及采集软件, 如图 3 所示.

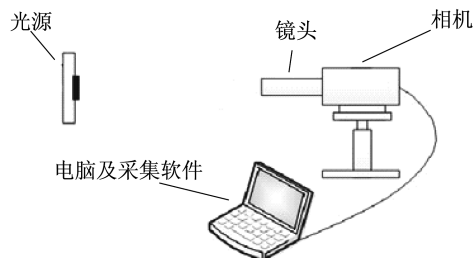


图3 光学测量系统

Fig.3 Optical measuring system

首先, 通过标定试验确定镜头的真实放大倍率;

其次,对喷雾水滴进行测量,合理调节光源位置(本试验采用逆光拍摄)、镜头焦距、相机帧率和相机曝光时间,使背景光均匀且水滴成像清晰,并存储多幅图片至计算机.对所获取的图片依次进行二值化、极小和极大面积去除、边缘不完整颗粒去除等预处理,再统计余下各颗粒所占像素数,由标定的放大倍率获得颗粒的真实投影面积,从而可得到各颗粒的等面积直径;最后,对同工况下的颗粒直径进行统计,获得该工况下的最大直径、最小直径和索太尔平均直径 D_{32} .

索太尔平均直径 D_{32} 的表达式为

$$D_{32} = \frac{\int_{D_{\min}}^{D_{\max}} D^3 \frac{dN}{dD} dD}{\int_{D_{\min}}^{D_{\max}} D^2 \frac{dN}{dD} dD} \quad (1)$$

式中, N 是直径为 D 的液滴数目; $D_{\min}$ 与 $D_{\max}$ 分别表示液滴的最小直径与最大直径,通常取 $D_{\min} = 0$.

试验中图像法测量的液滴直径采用随机方法捕捉,因此,单个液滴的粒径很少有重复,取 $N = 1$,式(1)可简化为

$$D_{32} = \frac{\sum D_i^3}{\sum D_i^2} \quad (2)$$

式中, D_i 表示图像中第 i 个液滴的直径.

压力变送器、涡轮流量计等输出的信号由 ADAM4118 型模拟输入模块采集,铂电阻信号由 ADAM4015 型 6 路热电阻模块采集,所有采集信号通过 A/D 转换器送入计算机,由数据采集程序实时采集并记录各项试验数据.

3 试验结果及分析

3.1 雾化过程

图 4 为额定负荷下距离喷口不同高度处的雾化情况.从图 4 中可以看出,距离喷口 400 mm 处,射流呈现大片的液膜状,部分液膜逐渐破裂成液线,部分液线逐渐破裂成液滴,有的已经完全成液滴状;在距离喷口 700 mm 处,液膜已经完全破裂成液滴;在距离喷口 1 000 mm 处,液滴很分散地存在.整个雾化的过程包括液膜形成、液膜破碎和液滴形成.喷嘴雾化过程受到惯性力、粘性力、气动力和液体的表面张力这 4 种力的相互作用,最终导致连续的液膜破裂成液柱、液线,进而破碎成液滴.

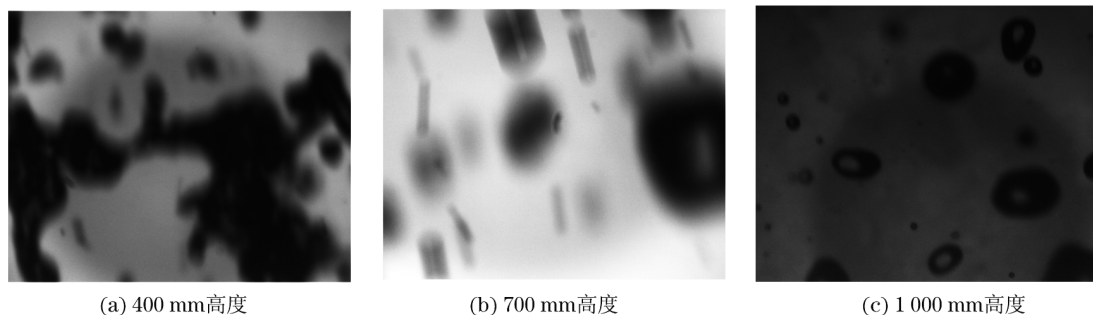


图 4 在额定负荷下距离喷口不同高度的雾化情况

Fig.4 Nozzle atomization situation at different height under rated load

3.2 雾化锥角

图 5(见下页)为不同负荷下喷嘴的雾化情况.从图 5 中可以看出不同负荷下喷嘴的雾化锥角,即喷嘴出口到雾矩外边界的两条切线之间的夹角.50%,75%和 100%的额定负荷的雾化锥角分别为 73° , 76° 和 79° .显然,随着负荷的增加,即喷射流量的增加,雾化锥角逐渐增大.

3.3 雾化对称性与雾化液滴粒径的平均分布情况

表 1(见下页)为弹簧喷嘴在额定负荷下距离喷嘴出口不同高度处不同测量位置液滴的索太尔直径、最小直径和最大直径.从表 1 中可以看出,在同一测量高度,如图 6 所示(见下页),随机选取 3 个不同测点的索太尔直径、最小直径和最大直径的差别不大,

可见,喷雾形状具有 360° 对称性,单个测点得到的直径具有代表性.

考察了弹簧喷嘴雾化液滴粒径的平均分布情况.液滴粒径 D 的数目累积分布 N_c (即小于某粒径的液滴数目占总数的百分率)和液滴粒径的体积累积分布 V_c (即小于某粒径的液滴的体积占总体积的百分率)如图 7 所示(见下页),并由体积累积分布 V_c 图得出水雾化后的液滴粒径 R-R(Rosin-Rammler)分布函数为

$$V_c = 1 - \exp[-(D/c)^n] = 1 - \exp[-(D/2.859)^{3.031}] \quad (3)$$

式中, D 表示液滴的粒径; c 为尺寸参数,反映整个水雾的粒径大小; n 为均匀度指数,反映整个水雾

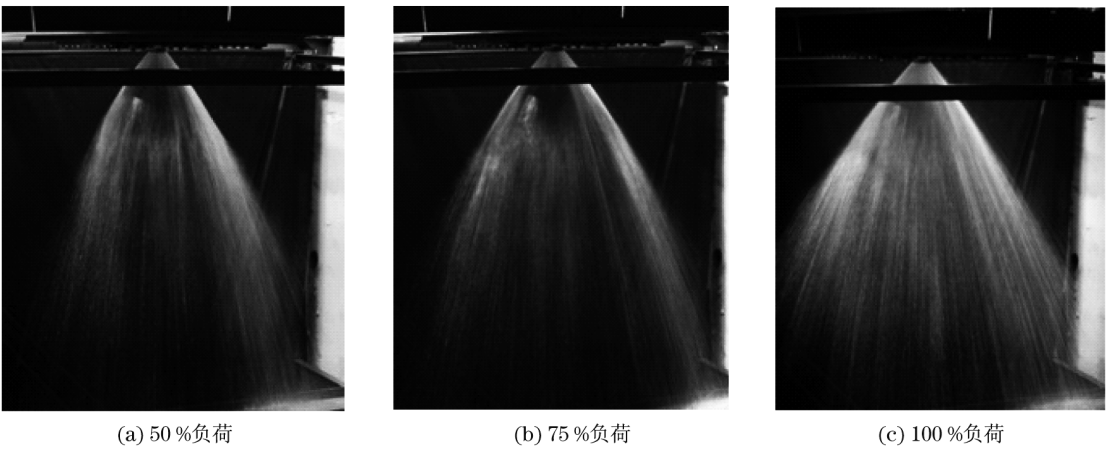


图 5 不同负荷下喷嘴的雾化情况
Fig.5 Nozzle atomization situation under different loads

表 1 在额定负荷下距离喷嘴出口不同高度处不同位置的液滴粒径

Tab.1 Droplet size under rated load at different altitude and distance from the nozzle outlet

距离喷嘴出口高度/mm	索太尔直径/mm			最小直径/mm			最大直径/mm		
	位置 1	位置 2	位置 3	位置 1	位置 2	位置 3	位置 1	位置 2	位置 3
400	3.47	3.73	3.48	0.08	0.09	0.09	3.73	3.47	3.48
700	5.51	5.71	5.78	0.15	0.08	0.14	5.51	5.71	5.78
1 000	3.36	3.99	3.88	0.13	0.11	0.15	3.36	3.99	3.88



图 6 光学测量位置示意图
Fig.6 Schematic diagram of optical measurement position

中粒径的分散程度; V_c 表示粒径小于等于 D 的所有液滴的体积与总体积的比值.

由图 7 可以看出,直径 1 mm 以下的小液滴虽然占液滴总数的 30%左右,但是,其体积却不足液滴总体积的 5%.广泛用于液体及粉末雾化领域的粒径分布为 R-R(Rosin-Rammler)分布^[12],大多数喷雾的 n 值在 1.5~4.0. n 值越大,颗粒的尺寸分布越均匀^[1].在式(3)中, $n = 3.031$,可见液滴的粒径分布比较均匀.

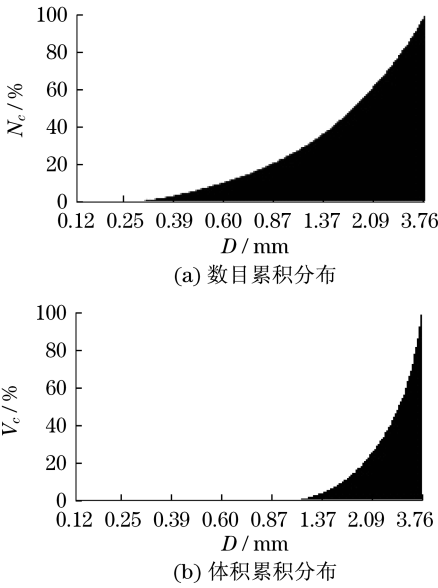


图 7 液滴粒径的数目累积分布和体积累积分布
Fig.7 Cumulative number distribution and cumulative volume distribution of the droplet size

3.4 喷嘴负荷对雾化性能的影响

表 2 为喷嘴在 50%,75%和 100%额定负荷下液滴的索太尔直径、最小直径和最大直径.其中,索太尔直径是取距离喷嘴出口 400,700,1 000 mm处的平均值,最小直径和最大直径分别是取距离喷嘴出口400,

表 2 喷嘴在不同负荷下的液滴粒径
Tab.2 Droplet size of the nozzle under different loads

负 荷	索太尔直径/mm	最小直径/mm	最大直径/mm
50%	3.96	0.06	4.93
75%	4.20	0.07	5.27
100%	4.43	0.08	5.78

700,1 000 mm 处的最小值和最大值. 如表 2 所示,随着喷嘴负荷的增加,喷嘴雾化液滴的索太尔直径、最小直径和最大直径都逐渐增大,这是因为随着喷嘴负荷的增加,喷嘴前后压差变大,喷嘴喷射流量增加,使得液膜破碎成液线和液滴的过程中液体喷射距离增加.在距喷嘴出口相同高度处,负荷比较大时的液滴粒径会比负荷较小时的大.

4 结 论

对弹簧喷嘴进行了雾化性能的试验研究,结论如下:

- a. 射流开始时呈连续的液膜,随后液膜破裂成液线,最终碎裂成液滴.在距离喷嘴出口 400 mm 处有液膜、液线和液滴同时存在;在距离喷嘴出口 700 mm 处已经完全没有液膜的存在;在距离喷嘴出口 1 000 mm 处液滴很分散地存在.
- b. 随着负荷的增加,喷嘴雾化锥角逐渐增大;50%,75%和 100%的额定负荷的雾化锥角分别为 73°,76°和 79°.
- c. 在额定负荷下,弹簧喷嘴雾化对称性比较好,雾化液滴的粒径分布也比较均匀.
- d. 随着负荷的增加,喷嘴雾化液滴的索太尔直径、最小直径和最大直径都逐渐增大.

参考文献:

[1] 曹建明. 雾化学[M]. 北京:机械工业出版社,2005.

[2] 黄鸣,袁益超,刘聿拯. 锅炉启动疏水回收至除氧器的降噪实验研究[J]. 上海理工大学学报,2011,33(1):95-99.

[3] Hasson D,Luss D,Peck R. Theoretical analyses of vapour condensation on laminar liquid jets[J]. Int J Heat Mass Transfer,1964,7(9):969-981.

[4] Hasson D,Luss D,Navon U. An experimental study of steam condensation on a laminar water sheet[J]. Int J Heat Mass Transfer,1964,7(9):983-1001.

[5] Lee S Y,Tankin R S. Study of liquid spray (water) in a condensable environment (steam) [J]. Int J Heat Mass Transfer,1984,27(3):363-374.

[6] Lee S Y,Tankin R S. Study of liquid spray (water) in a condensable environment (air) [J]. Int J Heat Mass Transfer,1984,27(3):351-361.

[7] 周磊,解茂昭,贾明. 燃油喷雾过程的大涡模拟研究[J]. 内燃机学报,2009,27(3):202-206.

[8] 赵志国,解茂昭,王翠华. 油雾碰撞高温壁面的油滴分裂及与热壁间换热研究[J]. 热能动力工程,2006,21(6):598-602.

[9] 马其良,张秋婷,毕政益. 内混式油喷嘴流量特性实验研究[J]. 上海理工大学学报,2006,28(3):253-256.

[10] 李崇超,张廷发,张明宝. 0.06 MPa 小压差 50 t/h 弹簧喷嘴的开发和应用[J]. 锅炉制造,2007(1):20-21.

[11] 沈惠. 电厂弹簧喷嘴除氧器设计和应用[J]. 江苏电机工程,1996,15(4):48-52.

[12] Rosin P,Rammler E. The laws governing the fineness of powered coal[J]. Journal of the Institute of Fuel,1993(7):29-36.

(编辑:石 瑛)