

# 双流体喷嘴雾化特性的试验研究

卢平<sup>1</sup>, 梁晓燕<sup>2</sup>, 章名耀<sup>3</sup>

(1. 南京师范大学 动力工程学院, 江苏 南京, 210042; 2. 国电南京自动化股份有限公司脱硫部, 江苏 南京 210008  
3. 东南大学 洁净煤燃烧与发电技术教育部重点实验室, 江苏 南京, 210096)

[摘要] 利用 PIV 测量技术, 通过试验研究了两种双流体雾化喷嘴(气泡雾化喷嘴和 Y 型喷嘴)的雾化特性, 分析了气液比、液体流量、喷嘴结构等对雾化性能的影响, 研究表明: 气泡雾化喷嘴的雾炬比双流体喷嘴更饱满, 雾化质量更好; 雾化颗粒平均粒径随着气液比增加呈现下降趋势, 当  $ALR > 0.04$  雾化颗粒平均粒径减小的趋势趋缓; 随着被雾化液体流量的增加, 雾化颗粒平均减小; 在相同混合室面积条件下, 增大雾化气注入孔截面积有利于雾化质量的提高。

[关键词] 雾化, 双流体雾化, 气泡雾化, 喷嘴, 气液比

[中图分类号] TK 121 [文献标识码] A [文章编号] 1672-1292(2008)01-0034-04

## Experimental Investigation on Atomizing Characteristics of Twin-fluid Nozzles

Lu Ping<sup>1</sup>, Liang Xiaoyan<sup>2</sup>, Zhang Mingyao<sup>3</sup>

(1. School of Power Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China  
2. FGD Branch, Guodian Nanjing Automation Co., Ltd. Nanjing 210008, China  
3. Key Laboratory of Clean Coal Power Generation and Combustion Technology of Chinese Educational Ministry, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract** Atomizing characteristics of two kinds of twin-fluid nozzles (effervescent nozzle and Y-type nozzle) are experimentally studied by using PIV technology; the influences of nozzle type, air to liquid ratio (ALR), liquid flow rate, nozzle internal geometry, etc on atomizing properties are analyzed. The atomizing experimental results show that atomization quality of effervescent nozzle is better than that of Y-type nozzle under the same condition. Sauter mean diameter (SMD,  $D_{32}$ ) of atomized particles decreases with increasing of air to liquid ratio; the decreasing degree reaches stability at  $ALR > 0.04$ . SMD of atomized particles decreases with increasing of liquid flow rate at the same air to liquid ratio; it will be helpful for atomization quality for effervescent nozzle to increase the injection area of atomization air in the same air injection area of internal mixture chamber.

**Key words** atomization, twin-fluid atomization, effervescent atomization, nozzle, air to liquid ratio

雾化广泛地用于造粒、干燥、增湿、表面喷涂、药剂喷洒、除尘等各种工业生产过程中。根据液体和浆状体的性质以及雾化质量的要求, 雾化类型有压力式雾化、旋转式雾化和气力式雾化 3 大类<sup>[1]</sup>。气力式雾化(又称双流体雾化)是利用一定压力的空气或蒸汽, 以高速冲击速度较低的被雾化液体, 将其撕裂成很细的液滴, 最常见气力式雾化喷嘴的是旋流型和 Y 型两种。Y 型喷嘴是一股液体和一股高速气流流速以 Y 型相交、冲击而雾化, 结构非常简单, 应用范围较广。气泡雾化方法 (Effervescent Atomization) 是由美国 Purdue University 的 Lefebvre 等人<sup>[2]</sup>于 1987 年首次提出的一种新的雾化方法, 它的雾化机理与传统的双流体雾化方法有本质区别<sup>[3]</sup>。气泡雾化是使液体和气体在共同流动过程中形成气液两相泡状流动, 通过气泡体积的变化实现液体的雾化。近年来, 国内外学者对气泡雾化方法及其雾化机理进行了广泛而深入的研究。Lefebvre 等人先后研究过气泡雾化喷嘴的液体喷射压力、气液比与喷孔直径、喷嘴内部结构等对液体雾化颗粒平均直径和尺寸分布的影响<sup>[4]</sup>。国内学者对于气泡雾化喷嘴也进行了一定的研究工作, 刘联胜<sup>[5]</sup>研究了内超声气泡雾化喷嘴的雾化特性。对于燃油类燃料, 吴道洪<sup>[6]</sup>率先在国际上将气泡雾化设想变成了现实, 在电力、石化、冶金、陶瓷等行业得到了广泛的应用。

收稿日期: 2007-10-22

基金项目: 江苏省普通高校自然科学基金计划 (07KJD610119) 资助项目。

作者简介: 卢平 (1968-), 副教授, 博士, 研究方向: 燃烧及其污染物控制。E-mail: luping@njnu.edu.cn

本文对两种不同型式的双流体气动雾化喷嘴(气泡雾化喷嘴和 Y 型喷嘴)进行了试验研究, 分析了气液比、液体流量、喷嘴结构等因素对雾化性能的影响, 旨在为烟气脱硫和高粘性燃料雾化等应用领域的喷嘴选择和喷嘴结构优化提供指导.

1 试验装置

喷嘴雾化系统试验装置如图 1 所示, 主要由被雾化液体输送系统、雾化空气系统、除雾系统和测量系统 4 个部分组成, 雾化流体(水或浆液)流量由电磁流量计(测量范围为  $0\sim 3\text{ m}^3/\text{h}$ )测量, 压缩空气流量由转子流量计测量. 雾化颗粒粒径的测量采用 PV 测量系统及二次开发的图像处理软件<sup>[7]</sup>. 喷嘴雾化雾炬和雾化角采用数码照像机直接拍摄, 并通过数字图像处理确定.

图 2 和图 3 分别给出了两种 Y 型雾化喷嘴和气泡雾化喷嘴结构示意图. Y 型喷嘴包括内外两层通道, 压缩空气通过剪切、冲击作用于被雾化液体, 再流经混合室, 最后从喷嘴喷出雾化. 气泡雾化喷嘴由外套管、中心管、喷嘴头部、雾化用压缩空气和液体进口等组成, 在中心管上密布小孔, 气泡雾化喷嘴结构尺寸如表 1 所示. 雾化气通过小孔与中心管内液体混合, 形成泡状流, 最后从喷嘴出口喷出. 实验时, 采用压缩空气作为雾化介质, 其压力  $< 0.5\text{ MPa}$ , 采用水作为被雾化液体, 测量温度为室温. 采用固定液体流量、调节压缩空气流量的方法, 达到改变气液比的目的.

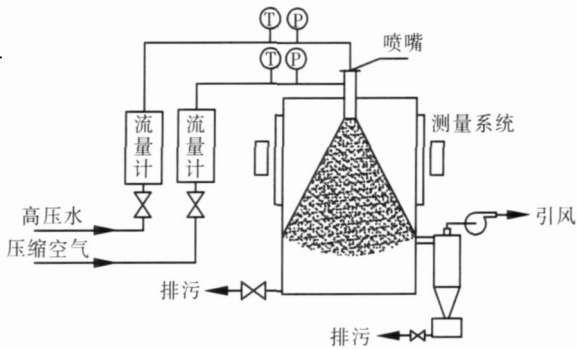


图 1 雾化试验装置示意图  
Fig.1 Schematic of atomization system

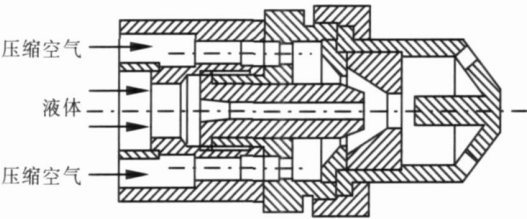


图 2 Y 型喷嘴结构示意图  
Fig.2 Schematic of Y-type atomizer

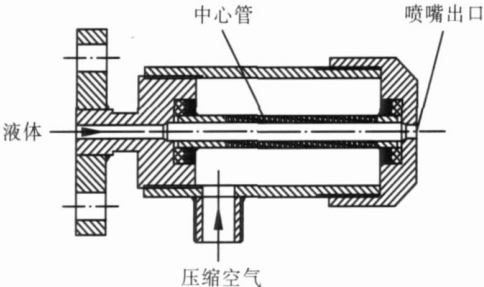


图 3 气泡雾化喷嘴示意图  
Fig.3 Schematic of effervescent atomizer

表 1 气泡雾化喷嘴的结构尺寸

Table 1 Dimensions of effervescent atomizer

喷嘴	液体入口 /mm	压缩空气入口 /mm	中心管小孔 /mm	中心管 /mm	喷嘴出口 /mm
A1	$\phi 8$	$\phi 25$	$442\times\phi 0.7$	$\phi 12\times 90$	$1\times\phi 5$
A2	$\phi 8$	$\phi 25$	$442\times\phi 0.7$	$\phi 12\times 90$	$1\times\phi 8$
A3	$\phi 8$	$\phi 25$	$204\times\phi 1.5$	$\phi 12\times 90$	$1\times\phi 8$

2 试验结果与分析

2.1 雾化角

图 4 给出了 Y 型喷嘴和气泡雾化喷嘴的雾炬照片, 由图中可以看出, 图 4(a) Y 型雾化喷嘴的雾炬(图 4(a))中心可见较为明显的丝(带)状液膜, 雾炬边缘存在颗粒较大的雾滴, 总体上雾炬核心区域较为瘦窄, 雾化效果相对较差; 气泡雾化喷嘴的雾炬(图 4(b))呈椭球型, 雾炬较为饱满, 雾炬中心未见带状流体, 雾化颗粒沿雾炬径向分布较为均匀, 且以极细的雾滴形式存在, 整体雾化效果良好. 就雾化角而言, 由于其受射流的影响, 变化不大, 约为  $30^\circ$ .

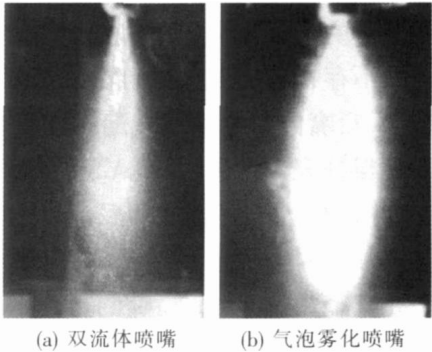


图 4 喷嘴雾化雾炬图  
Fig.4 Photos of spray

从整个雾炬形状来看,雾炬先向两侧扩展,在离喷嘴出口一段距离后雾炬开始收缩.这是由于高速流动的两相流体从喷嘴喷出后,引起雾化室内空气动力场的变化,在雾炬中心形成负压,从而使雾炬向内收缩.

2.2 气液比对喷嘴雾化质量的影响

图 5 为 Y 型雾化喷嘴的雾化曲线,由图可知,在同一雾化压力条件下,雾化颗粒平均粒径 (Sauter mean diameter,  $D_{32}$ ) 随着液气比 (air to-liquid ratio ALR) 的增加逐渐减小,在测量雾化压力为 0.28~0.48 MPa 范围内,且  $ALR < 0.80$  条件下,雾化颗粒平均粒径随 ALR 的增加呈现单调下降的趋势,当  $ALR > 0.80$  时,雾化平均粒径下降趋缓,并逐渐稳定在 30  $\mu\text{m}$  左右,另外,在测量雾化压力范围内,雾化平均粒径主要受气液比的影响,雾化压力对喷嘴雾化粒径的影响较小.

图 6 分别给出了 A1 型气泡雾化喷嘴的雾化性能曲线.由图可以看出:在相同液体流量下,雾化颗粒平均粒径同样随着 ALR 的增加而逐渐减小,当  $ALR > 0.04$  时,雾化颗粒平均粒径减小的趋势减缓,并逐渐趋于平稳值 (20  $\mu\text{m}$  左右).结合图 5 和图 6 分析可知,在相同 ALR 条件下,气泡雾化的雾化平均粒径更小.换句话说,要获得相同的雾化效果,气泡雾化喷嘴所消耗的雾化气更少,雾化更经济.究其原因是: (1) 对于气泡雾化喷嘴,在低气液比时,气体的注入混合室小孔的速度较低,气体与液体混合的过程中容易形成均匀的泡状流动.另外,随着 ALR 的增大,气液两相流的流动速度增加,加强了气体对液体的剪切作用,这两者均对气泡雾化效果产生了促进作用; (2) 随着 ALR 的增加,气液两相流中气体的体积空隙率增大,从而使喷嘴出口处的气相体积增加,加强了气相对液相的挤压作用,使液体以更细、更薄的液膜形式喷出; (3) 气相份额增加的同时也增加了气液两相流中气泡份额,使气泡具有的总膨胀能增加,加强了气泡喷嘴下游流体中气泡破裂对液体的爆破作用,进一步提高了雾化效果.

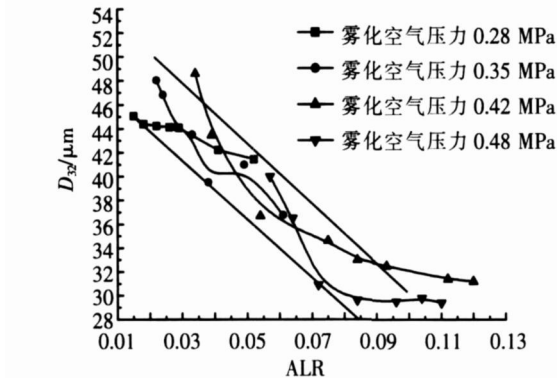


图 5 双流体喷嘴雾化性能曲线

Fig.5 Influence of air to liquid ratio on spray SMD of Y-type atomizer

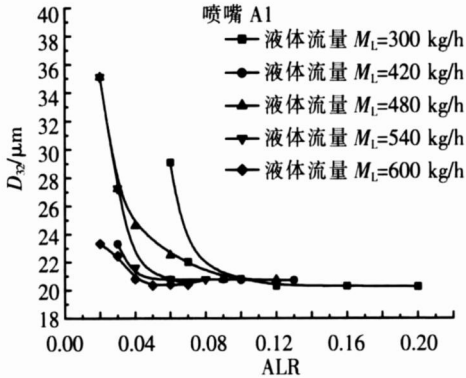


图 6 气泡喷嘴雾化性能曲线

Fig.6 Influence of air to liquid ratio on spray SMD of effervescent atomizer

2.3 液体流量对喷嘴雾化质量的影响

由图 6 还可以看出,对于一定结构尺寸的气泡雾化喷嘴,在相同气液比下,随着被雾化流体流量的增加,雾化颗粒平均粒径减小,且获得起始最小雾化平均粒径的 ALR 逐渐降低.对于  $M_L = 600 \text{ kg/h}$  获得起始最小粒径所对应的  $ALR = 0.4$ ,而对于  $M_L = 300 \text{ kg/h}$ ,其对应的  $ALR = 0.10$  这表明,对于一定结构的气泡雾化喷嘴有其对应的最佳操作条件,降低被雾化液体的流量将会导致气泡雾化喷嘴的雾化效果恶化,而在合适的液体流量下,气泡雾化喷嘴内部混合室内及出口部分的两相流是一种近似均匀的泡状流型,气液之间不存在分层现象,因此,在较低气耗率的条件下可以获得比较好的雾化效果.

2.4 喷嘴内部结构对气泡雾化喷嘴雾化质量的影响

根据表 1 计算可得: A2 型喷嘴中心管小孔直径为 0.7,小孔数为 442 个,总开孔面积为 170.1  $\text{mm}^2$ ; A3 型喷嘴中心管小孔直径为 1.5,小孔数为 204 个,总开孔面积为 360.5  $\text{mm}^2$ .图 7 给出了压缩空气通过小孔注入面积对雾化质量的影响,由图可知,在相同气液比下,小孔孔径为 1.5 mm 喷嘴的雾化平均粒径小于小孔孔径为 0.7 mm 喷嘴的雾化平均粒径,且随着气液比的提高,雾化平均粒径的差距减小.因此,可以认为在相同的混合室面积条件下,提高小孔总截面积 (中心管开孔率) 有利于雾化质量的改善,且在低液气比条件下更为显著.究其原因主要在于:在相同气液比和液体流量的条件下,随着开孔率的提高,雾化气注入总面积增加,气体流动速度相对较小,气泡破碎和凝聚的机率减小,从而有利于混合室内泡状两相流的

形成;而开孔率较低时,中心管小孔截面的空气流动速度相对较高,气体对液体的冲击加剧,破坏了泡状两相流动的稳定,从而使雾化效果恶化<sup>[8-9]</sup>。郭志辉等人<sup>[10]</sup>研究认为中心管上注气孔数目增多、注气孔径缩小均有利于提高喷嘴的雾化质量。结合本文的研究可以认为:在气体注气总截面积相同情况下,随着注气孔孔径的缩小和注气孔数目的增多,将有利于雾化质量的提高,而在不同注气截面积下,注气孔总截面积(开孔率)对雾化质量影响较大。

### 3 结论

- (1) 在相同气液比下,气泡雾化喷嘴的雾炬比Y型喷嘴更饱满,雾化质量更好。
- (2) 雾化颗粒平均粒径随着气液比增加呈现下降趋势,当 $ALR > 0.04$ 雾化颗粒平均粒径减小的趋势趋缓。
- (3) 对气泡雾化喷嘴,被雾化液体流量对雾化效果有较大影响,在相同气液比下,随着被雾化液体流量的增加,雾化颗粒平均减小,获得起始最小雾化粒径的 $ALR$ 逐渐降低。
- (4) 增加雾化气注入孔总截面积有利于雾化质量的提高,在低气液比时,雾化气注入总面积对雾化效果的影响更为显著。

### [参考文献] (References)

- [1] 王喜忠,于才渊,周才君. 喷雾干燥[M]. 2版. 北京: 化学工业出版社, 2003: 1-21  
Wang Xizhong, Yu Caiyuan, Zhou Caijun. Spray Drying[M]. 2nd ed. Beijing: Chemical Industrial Press, 2003: 1-21 (in Chinese)
- [2] Lefebvre AH, Wang XF, Martin CA. Spray characteristics of aerated liquid pressure atomizers [J]. AIAA J Prop Power 1988, 4(4): 293-298
- [3] Buckner H N, Sojka P E, Lefebvre A H. Effervescent atomization of non-Newtonian single phase liquids [C] // Proceedings of the 4th Annual Conf on Atomization and Spray Systems Hartford Connecticut 1990: 93-97.
- [4] Sovani S D, Sojka P E, Lefebvre A H. Effervescent atomization [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2001, 27(2): 483-521.
- [5] 刘联胜, 吴晋湘, 韩振兴, 等. 内超声气泡雾化喷嘴实验研究 [J]. 燃烧科学与技术, 2002, 8(2): 155-158  
Liu Liansheng, Wu Jinxiang, Han Zhenxing, et al. Experimental studies on ultrasonic effervescent atomizers [J]. J of Combustion Science and Technology, 2002, 8(2): 155-158 (in Chinese)
- [6] 吴道洪. WDH 型气泡雾化喷嘴的流量特性研究 [J]. 工业加热, 1999(1): 7-13  
Wu Daohong. A study of the flow characteristics of WDH type bubble fogging burners [J]. Industrial Heating, 1999(1): 7-13 (in Chinese)
- [7] 卢平, 陆勇, 章名耀. 水煤膏冷态雾化试验装置和测量系统的研究 [J]. 热能动力工程, 2003, 18(2): 147-150  
Lu Ping, Lu Yong, Zhang Mingyao. The study of a cold state atomization test rig and a measurement system for coal water paste [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2003, 18(2): 147-150 (in Chinese)
- [8] 刘联胜, 吴晋湘, 韩振兴, 等. 气泡雾化喷嘴混合室内两相流型及喷嘴喷雾稳定性 [J]. 燃烧科学与技术, 2002, 8(4): 353-357  
Liu Liansheng, Wu Jinxiang, Han Zhenxing, et al. Investigation on the flow pattern in mixing chamber and stability of spray of effervescent atomizers [J]. J of Combustion Science and Technology, 2002, 8(4): 353-357. (in Chinese)
- [9] 安恩科, 徐唯韧, 朱基木, 等. 气泡雾化喷嘴的试验研究 [J]. 发电设备, 2002(6): 11-14  
An Enke, Xu Weiren, Zhu Jimu, et al. Experimental research on bubble atomization nozzles [J]. Power Equipment, 2002 (6): 11-14 (in Chinese)
- [10] 郭志辉, 徐行, 梁雪苹, 等. 一种新型气泡雾化喷嘴水平喷射特性的研究 [J]. 推进技术, 1997, 18(5): 78-81  
Guo Zhihui, Xu Hang, Liang Xueping, et al. Study on horizontal injecting characteristics of a new type of effervescent atomizers [J]. J of Propulsion Technology, 1997, 18(5): 78-81. (in Chinese)

[责任编辑: 刘健]

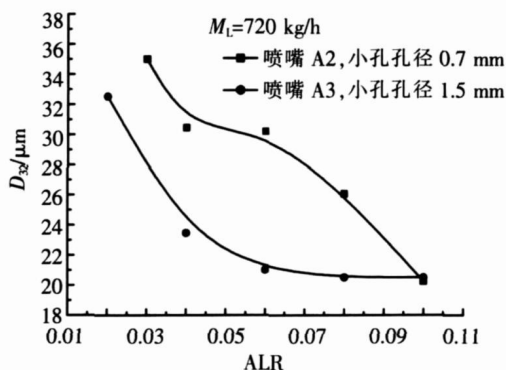


图7 气体注入孔截面积对雾化质量的影响

Fig.7 Influence of atomizing air injection area on spray SMD