

气泡雾化高黏度流体的实验研究

刘猛, 段钰锋, 张铁男

(东南大学能源与环境学院, 江苏省南京市 210096)

Experimental Research of Effervescent Atomization of High Viscosity Fluids

LIU Meng, DUAN Yufeng, ZHANG Tienan

(School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu Province, China)

ABSTRACT: The purpose of this research was to investigate the dependence of effervescent spray performance on fluid properties and atomizer internal design. The spray liquid included water and six kinds of high viscosity fluids. With the phase doppler particle analyzer (PDPA), spray characteristics of various fluids were investigated. The influence of atomizer geometries and operating parameters were discussed. Increasing air-to-liquid ratio (ALR) will reduce droplets Sauter mean diameter (SMD) effectively. The largest SMD along radial is less than 120 μm . The exit orifice diameter and air injection diameter affects droplets SMD significantly, while the change of air injection angle and mixing chamber length has less effects on droplets SMD. The atomization quality of non-Newtonian fluid drops when the mixing chamber length increases. With the addition of xanthan gum the droplets SMD increase dramatically. The SMD of water is 60~95 μm , and the SMD of viscous fluids is 60-120 μm .

KEY WORDS: atomizer; effervescent atomization; air-to-liquid ratio (ALR); Sauter mean diameter (SMD); viscous fluids; non-Newtonian fluids

摘要: 该文主要为研究液体性质以及喷嘴结构对气泡喷嘴雾化特性的影响。实验用浆体包括水和6种高黏度流体。采用相位多普勒粒子分析仪对多种流体进行雾化实验研究。对喷嘴几何结构和操作参数对雾化的影响进行了讨论。雾化液滴沿径向的索特平均直径(Sauter mean diameter, SMD)最大值在120 μm 以内。提高气液比能有效降低雾化液滴 SMD。喷嘴出口直径和注气孔直径对水的雾化液滴 SMD 的影响显著, 而改变注气角度和混合室长度对水的雾化液滴 SMD 影

响不大。混合室长度增加后, 非牛顿流体的雾化质量有一定下降。黄原胶添加量的提高对雾化液滴 SMD 有很大影响。在雾化介质为水的情况下, 液滴 SMD 变化范围为 60~95 μm ; 雾化高黏度流体时 SMD 范围为 60~120 μm 。

关键词: 喷嘴; 气泡雾化; 气液比; 索特平均直径; 高黏度流体; 非牛顿流体

0 引言

大型水煤浆气流床气化炉是目前主流的气化工艺, 其中核心技术之一是水煤浆雾化喷嘴^[1-3]。水煤浆在雾化之后比表面积会大大增加, 有利于提高炉内热质交换能力, 加快气化反应进程。A. H. Lefebvre 在 20 世纪 80 年代末提出气泡雾化喷嘴^[4]概念, 这是一种高效的气动喷嘴。该喷嘴先将气体以小气泡的形式注入液体上游, 然后在下游混合室中形成稳定的气泡两相流动, 最后液体在混合室下游的锥形段加速形成液膜并被气流破碎成小液滴实现雾化。气泡喷嘴具有雾化质量高、耗气率低和不易堵塞的优点, 是一种适合雾化高黏度液体燃料和水煤浆的新式喷嘴, 已引起学术界和技术界的关注^[5-12]。刘联胜^[13]研究了表面张力对雾化特性的影响, 并得出表面张力越大液雾粒径越大的结论。梁雪萍^[14]对水平雾化进行了研究, 认为混合室长度存在一个最佳值, 混合室长度过大或过小都不利于雾化。S. C. Geckler^[15]对聚合物溶液的气泡雾化性能进行了分析, 得到以下结论: 当聚合物溶液浓度较低时, 索特平均直径(Sauter mean diameter, SMD)大小主要依赖于溶液浓度, 而浓度较高时则依赖于聚合物的分子量。水煤浆是一种非牛顿流体, 因此通过对非牛顿流体和高黏度牛顿流体进行雾化实验研究可以对今后开发大型水煤浆雾化喷嘴提供

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(973 项目)(2010CB227001); 浙江大学能源清洁利用国家重点实验室开放基金资助项目(ZJUJCEU2010002, ZJUJCEU2010010)。

The National Basic Research Program of China (973 Program) (2010CB227001); The Opening Foundation Project of the State Key Laboratory of Clean Energy Utilization of China (ZJUJCEU2010002, ZJUJCEU2010010).

理论和经验指导。本文从喷嘴几何参数、操作参数以及液体物性参数角度分析了各参数对气泡雾化喷嘴下游雾化场的影响。

1 实验设备

依据文献[16]设计加工了一个气泡雾化喷嘴(图 1 所示),混合室上游为液体入口,表面开有注气孔,喷嘴出口处加工成缩放形式。喷嘴的供液供气系统(图 2 所示)包括高压气源和压力罐,以及流量计和阀门管路。雾化液滴信息的数据采集采用相位多普勒粒子分析仪(phase doppler particle analyzer, PDPA)。

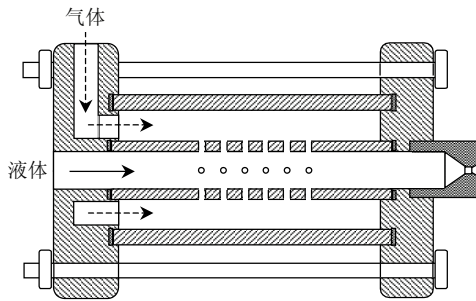
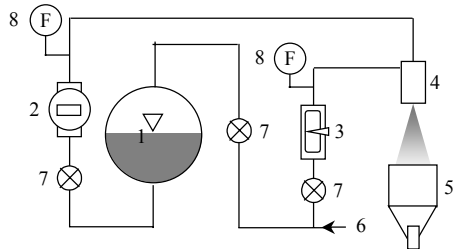


图 1 喷嘴结构图

Fig. 1 Schematic layout of effervescent atomizer



1—压力罐; 2—液体流量计; 3—气体流量计; 4—喷嘴; 5—集雾室;
6—高压气体入口; 7—阀门; 8—压力表。

图 2 雾化系统示意图

Fig. 2 Schematic of spray system

试验过程包括: 在压力罐中装有一定的液体, 利用管道向液面上方注入高压气体, 压力罐中的液体在高压气体的推动作用进入喷嘴的混合室, 同时气路高压气体由注气孔进入混合室同液体混合并离开喷嘴实现雾化。实验过程在常温、常压下进行, 注气压力保持在 0.4 MPa, 喷嘴垂直安放。文中所使用的压力参数均为表压力。雾化平均粒径 $SMD(D_{SM})$ 计算使用公式:

$$D_{SM} = \frac{\sum_i n_i D_i^3}{\sum_i n_i D_i^2} \quad (1)$$

2 实验结果及分析

2.1 流体物性对雾化质量的影响

实验用流体包括水、甘油水溶液和甘油黄原胶溶液, 表 1 中所列即为各种流体的物理性质。水是最基本的牛顿流体, 甘油水溶液是高黏度牛顿流体, 黄原胶甘油溶液则是非牛顿流体。由于水煤浆是黑色不透明浆体, 无法使用 PDPA 对其雾化下游流场进行测量, 所以通过将黄原胶与甘油混合可以获得流变特性与水煤浆接近的透明高黏度流体来进行模拟水煤浆雾化实验。图 3 中所示为实验用非牛顿流体和高黏度牛顿流体的流变特性曲线。可以明显的观察到, 当剪切速率提高后, 非牛顿流体 X1—X3 的表观黏度急剧下降并逐渐趋于平缓, 而高黏度牛顿流体 G2 的表观黏度几乎不发生改变。表 1 中所列为实验采用的水和 6 种高黏度流体的物理性质。

表 1 流体的物性参数及流变特性参数

Tab. 1 Physical and rheological parameters of fluids used in the atomization experiments

实验用流体 配比/代号	$\rho /$ (kg/m^3)	表面张力 $\sigma /$ (N/m)	黏稠系数 $K /$ ($\text{mPa}\cdot\text{s}$)	流变 指数 n	屈服应力 $\tau_s /$ Pa
水	998	0.072	1	1.00	0.00
0.96 甘油/0.04 水/G1	1230	0.062	418	1.00	0.00
0.94 甘油/0.06 水/G2	1225	0.063	286	1.00	0.00
0.92 甘油/0.08 水/G3	1220	0.064	196	1.00	0.00
0.75 甘油/0.248 水/ 0.002 黄原胶/X1	1190	0.065	161	0.87	3.37
0.73 甘油/0.267 水/ 0.003 黄原胶/X2	1180	0.066	200	0.90	7.31
0.70 甘油/0.295 水/ 0.005 黄原胶/X3	1160	0.068	711	0.671	9.22

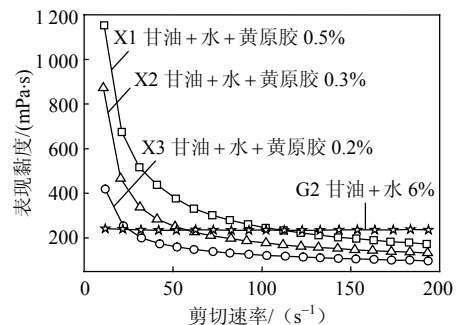


图 3 高黏度流体的流变特性

Fig. 3 Rheological of high viscosity fluids

2.2 结构参数对水的雾化下游流场的影响

水是最常见的雾化介质, 通过对水进行雾化可

以很容易的观察观察到喷嘴结构参数对雾化的影响。图4—7是在喷嘴下方250 mm的水平截面处所取得的数据,其中气液比(air-to-liquid ratio, ALR) R 为0.1,注气压力为0.4 MPa。图4中所示为喷嘴尺寸对雾化的影响,当喷嘴出口直径为1.5 mm时液体流量为35 kg/h,喷嘴出口直径增大到2.0 mm时流量提高至55 kg/h。

由图4可以发现当喷嘴出口直径增大后, D_{SM} 有很大幅度的下降,这是由于在相同ALR下喷嘴出口直径增大导致气体流量大大增加,气流对液体

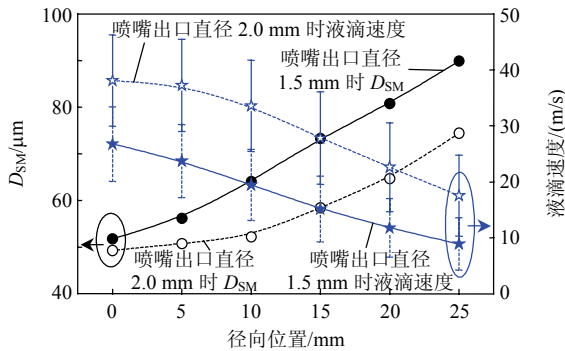


图4 喷嘴出口直径对雾化的影响

Fig. 4 Influence of exit orifice diameter on spray

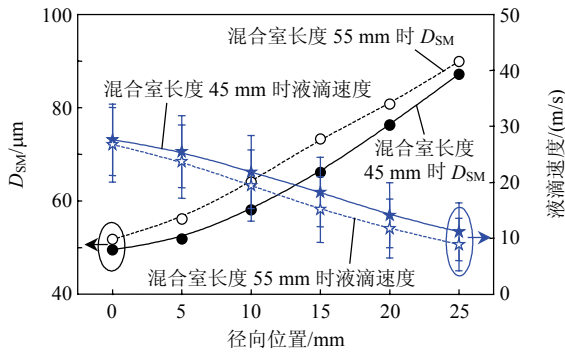


图5 混合室长度对雾化的影响

Fig. 5 Influence of mixing chamber length on spray

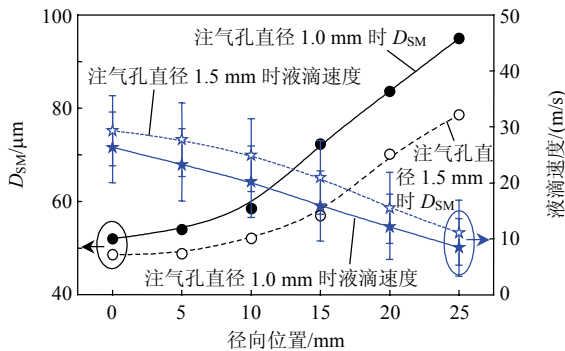


图6 注气孔直径对雾化的影响

Fig. 6 Influence of injection hole diameter on spray

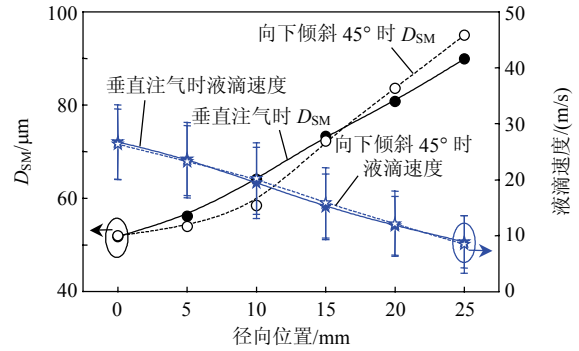


图7 注气角度对雾化的影响

Fig. 7 Influence of air injection angle on spray

破碎作用增强,液体颗粒 D_{SM} 降低。同时,由图4可知喷嘴出口直径增大使液滴速度平均增大约10 m/s,这表明气动力对雾化质量的影响比较大。喷嘴出口直径的增加使喷嘴的额定流量获得大幅提高,这对气泡喷嘴在工业运用中大型化是十分有利的。喷嘴出口直径增大不仅能降低加工难度,更可以有效防止燃烧过程中的结焦现象。

由图5可以发现,当混合室长度增大后各测点的 D_{SM} 平均增长约5 μm ,雾化质量略有下降。R. A. Wade^[17]将其解释为混合室内流动形态发生了改变所致。

图6为注气孔直径对液滴 D_{SM} 的影响,由于实验中所采用的注气管(即混合室的外壁)开孔数目为定值,增大注气孔直径相当于增大注气孔总面积。当注气孔直径提高后雾化场边缘处 D_{SM} 下降了16 μm ,雾化质量有所改善。这是由于大注气孔对气流的阻力较小,使混合室内更容易形成稳定的环状流所造成的。但是注气孔增大也是有一定限度的,在固定的液体流量和 R 下,当注气孔直径过大时,气体流速会相应下降,气体贯穿能力响应下降,导致气泡难以到达液体中心区形成稳定的环状流,因此,注气孔直径存在一个最佳值。

喷嘴结构包括2种不同的注气角度,一种为垂直注气,另一种为向下倾斜45°注气。从图7中可以观察到,注气角度的改变对雾化液滴 D_{SM} 和液滴平均速度基本没有影响。这说明对于水的气泡雾化而言,调整注气角度不会引起混合室内流动型发生改变。

2.3 气液比对高黏度流体雾化液滴 D_{SM} 的影响

R 是气动喷嘴的重要操作参数。根据高黏度流体在不同 R 下的雾化性能,可以制定经济合理的操作参数。图8显示,对于黄原胶含量为0.3%的非牛

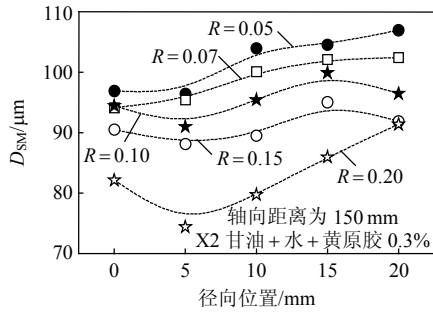


图 8 R 对雾化 D_{SM} 的影响
Fig. 8 Influence of R on spray D_{SM}

顿流体 X2, 当 R 为 0.20 时获得了最佳的雾化效果, D_{SM} 均在 $95\ \mu\text{m}$ 以下, 但此时的耗气量比较大; 当 R 下降到 0.15 时, D_{SM} 维持在 $85\sim 95\ \mu\text{m}$ 间。随着 R 的进一步降低, 雾化质量开始恶化, 当 R 降低至 0.05 时, 径向末端的 D_{SM} 已经接近 $110\ \mu\text{m}$ 。这说明气动力的作用对雾化质量的影响是至关重要的。

将高黏度流体的雾化液滴 D_{SM} 与水的结果对比可以发现, 雾化高黏度流体难度较大。有学者曾提出流体黏度对雾化影响不大的观点, 但这是在黏度没有发生数量级改变的情况下所得出的结论。

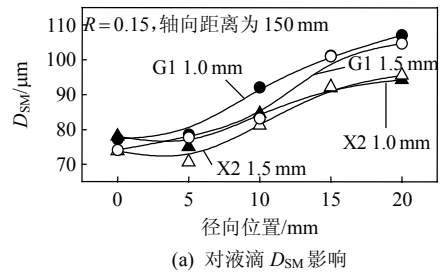
2.4 高黏度流体雾化下游流场分析

通过分析喷嘴几何结构改变对不同种类的高黏度流体雾化质量的影响可以了解流体性质对各种喷嘴结构的敏感性。为了降低液体质量流量对结果的干扰, 流体质量流量选择在 $55\sim 65\ \text{kg/h}$ 范围内。

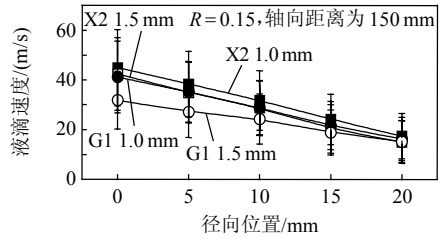
图 9 表明: 当注气孔直径由 $1.0\ \text{mm}$ 增大到 $1.5\ \text{mm}$ 后, 在雾炬中心附近的雾化效果有一定程度的提高, 这与之前对水的分析是完全一致的。雾炬边缘处 D_{SM} 之所以相对较大, 是因为该区域液滴与周围空气的相对速度过低, 以至于无法进一步破碎成小液滴造成的。从该图中还可以观察到, 雾化液滴速度沿径向分布呈明显的线性下降趋势, 雾炬中心处速度可达 $40\ \text{m/s}$ 以上, 穿透能力较强。在气化炉中, 这可以加快水煤浆中水分的蒸发, 从而改善炉膛内热量的分布, 防止局部超温。

由图 10 可以发现, 高黏度流体 X3 和 G3 的雾化液滴 D_{SM} 沿径向分布基本保持稳定。高黏度流体 X3 的 D_{SM} 波动比 G3 略大, 这说明非牛顿流体对注气方式所造成的影响更敏感, 因为注气方式的改变会导致注气孔周围非牛顿流体局部剪切速率发生变化, 从影响非牛顿流体表观黏度。

图 11 所示为混合室长度对雾化的影响。当混



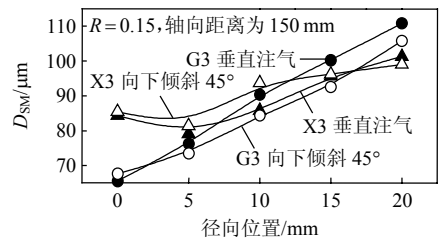
(a) 对液滴 D_{SM} 影响



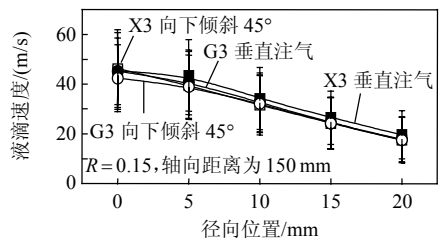
(b) 对液滴速度的影响

图 9 注气孔直径对高黏度流体雾化液滴的粒径和速度的影响

Fig. 9 Influence of injection hole diameter on spray droplet diameter and velocity of high viscosity fluids



(a) 对液滴 D_{SM} 影响



(b) 对液滴速度的影响

图 10 注气方式对高黏度流体雾化液滴的粒径和速度的影响

Fig. 10 Influence of injection angle on spray droplet diameter and velocity of high viscosity fluids

合室长度增加后, 黄原胶甘油溶液 X3 的雾化液滴 D_{SM} 上升约 $15\ \mu\text{m}$, 雾化质量出现了一定程度的下降。这是因为随着混合室的生长, 混合室内气液两相间的相对流速有一定程度的下降, 造成非牛顿流体局部剪切速率下降, 使雾化难度提高所致。而对于流体 G2 这种高黏度牛顿流体则不会有以上情况发生, 因此其受混合室长度变化的影响相对较小。

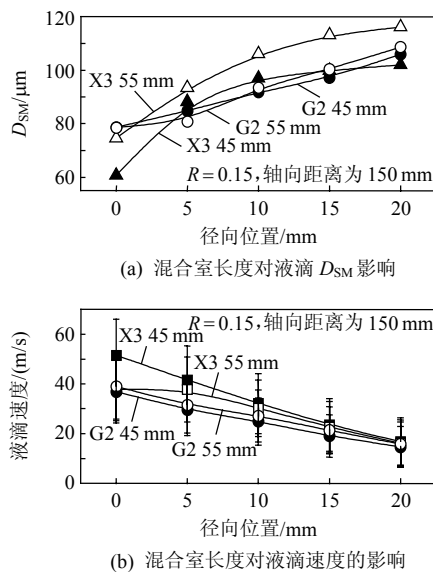


图 11 混合室长度对高黏度流体雾化液滴的粒径和速度的影响

Fig. 11 Influence of mixing chamber length on spray droplet diameter and velocity of high viscosity fluids

图 12 是对工作参数 ALR 为 0.15, 混合室长度 45 mm, 倾斜注气孔直径 1.0 mm 时的 3 种浓度黄原胶甘油溶液的横向对比。随着黄原胶添加量的上升, 雾化难度明显提升。结果显示, 当黄原胶质量分数由 0.2% 提升至 0.5% 时, D_{SM} 径向分布规律发生突变, 雾化质量出现严重下降。这是由于浆体在发生形变时其内部大分子的取向也会同时发生改变, 而分子取向改变在宏观上就表现为附加黏度, 从而使雾化高黏度流体的难度有一定提升。

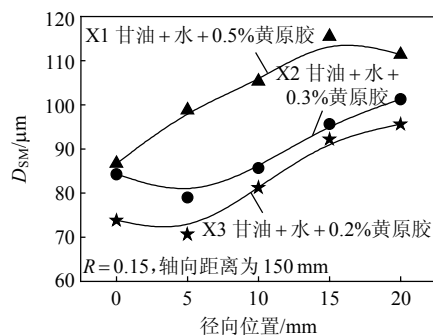


图 12 黄原胶添加量对雾化效果的影响

Fig. 12 Addition of Xanthan gum on the performance of atomization

3 结论

1) 随着径向位置的增大, SMD 总体呈上升趋势而液滴速度呈下降趋势, 这是由于雾炬边缘处气流速度相对较低造成的。

2) 对水的气泡雾化实验发现, 喷嘴出口直径和注气孔直径对雾化液滴 SMD 影响较大, 当喷嘴出口直径由 1.5 mm 提升至 2.0 mm 或注气孔直径由 1.0 mm 增大至 1.5 mm 时, 水的雾化液滴 SMD 都获得明显下降, 而混合室长度由 45 mm 提升至 55 mm 或注气角度由垂直注气改为向下倾斜 45° 则对水的雾化液滴 SMD 影响不大。

3) ALR 对高黏度流体的雾化质量影响很大, 增大 ALR 会使雾化液滴 SMD 显著下降。

4) 当混合室长度由 45 mm 加长至 55 mm 后, 非牛顿流体的雾化质量有一定程度的下降, 这是由于非牛顿流体的局部剪切速率下降, 使其雾化难度提高所致。

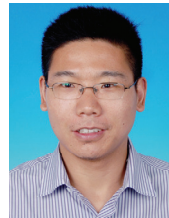
5) 实验所采用的高黏度流体的黏度由 161 mPa·s 变化至 711 mPa·s 期间, 其雾化液滴 SMD 在各径向位置均在 $120 \mu\text{m}$ 以内。

6) 随着黄原胶甘油溶液的黄原胶含量由 0.2% 提升至 0.5%, 雾化液滴 SMD 沿径向分布规律发生突变且雾化质量发生严重下降。

参考文献

- [1] 黄镇宇, 张传名, 李习臣, 等. 6 t/h 撞击式水煤浆喷嘴雾化特性试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(6): 201-204.
Huang Zhenyu, Zhang Chuanming, Li Xichen, et al. A research on atomization characteristics of 6t/h striking-typed CWS atomizer[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(6): 201-204(in Chinese).
- [2] 于海龙, 张传名, 刘建忠, 等. 新型水煤浆喷嘴雾化性能试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(22): 99-103.
Yu Hailong, Zhang Chuanming, Liu Jianzhong, et al. Experimental study of atomizing performance of a new type nozzle for coal water slurry[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(22): 99-103(in Chinese).
- [3] 于海龙, 刘建忠, 范晓伟, 等. 喷嘴结构对水煤浆喷嘴雾化性能影响的试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(14): 80-85.
Yu Hailong, Liu Jianzhong, Fan Xiaowei, et al. Experimental study of atomizing performance of a new type nozzle for coal water slurry[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(14): 80-85(in Chinese).
- [4] Lefebvre A H, Wang X F, Martin C A. Spray characteristics of aerated-liquid pressure atomizers[J]. Journal of Propulsion and Power, 1988, 4(4): 293-298.

- [5] Yuan K, Chen L F, Wu C K. Study on characteristics of different types of nozzles for coal-water slurry atomization [J]. *Journal of Thermal Science*, 2001, 10(4): 331-335.
- [6] Sojka P E, Lefebvre A H. A novel method of atomizing coal-water slurry fuels[R]. Pittsburgh: U. S. Department of Energy, 1990.
- [7] Mostafa A A, Khalil A S. Measurements of coal water slurry sprays produced by an effervescent atomizer[C]//42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, Sacramento, 2006.
- [8] Jedelsky J, Jicha M, Slama J, et al. Development of an effervescent atomizer for industrial burners[J]. *Energy Fuels*, 2009, 23(12): 6121-6130.
- [9] Ferreira M E C, Martins J J G, Teixeira J C F. Optimization of an effervescent atomizer to the combustion of residue oils[C]//2005 ASME Summer Heat Transfer Conference, San Francisco, 2005.
- [10] Yu G, Li J, Zhang X. Investigation of liquid hydrocarbon combustion in supersonic flows using effervescent atomization[C]//38th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, Indianapolis, 2002.
- [11] 杨华, 杜聪, 周晓芳, 等. 空气旋流强度对气泡雾化喷雾流场及火焰的影响[J]. *燃烧科学与技术*, 2008, 14(6): 523-528.
Yang Hua, Du Cong, Zhou Xiaofang, et al. Influences of air swirl intensity on the atomization and combustion performances of effervescent atomized spray[J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2008, 14(6): 523-528(in Chinese).
- [12] 刘联胜, 杨华, 衡国辉, 等. 气液质量流量比对气泡雾化喷嘴燃烧特性的影响[J]. *燃烧科学与技术*, 2007, 13(1): 10-14.
Liu Liansheng, Yang Hua, Heng Guohui, et al. Influences of air/liquid mass flow rate on spray combustion Produced by effervescent atomizer[J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2007, 13(1): 10-14(in Chinese).
- [13] 刘联胜, 吴晋湘, 韩振兴, 等. 气泡雾化喷嘴在不同液体物性下的喷雾特性研究[J]. *热科学与技术*, 2002, 1(2): 128-132.
Liu Liansheng, Wu Jinxiang, Han Zhenxing, et al. Studies of effervescent atomization at different physical properties of spray fluid[J]. *Journal of Thermal Science and Technology*, 2002, 1(2): 128-132(in Chinese).
- [14] 梁雪萍, 郭志辉, 徐行, 等. 气泡雾化喷嘴水平喷射的雾化特性研究[J]. *北京航空航天大学学报*, 1998, 24(1): 24-27.
Liang Xueping, Guo Zhihui, Xu Hang, et al. Influence of gas injector geometry on atomization performance of horizontally injecting effervescent atomizers[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 1998, 24(1): 24-27(in Chinese).
- [15] Geckler S C, Sojka P E. Effervescent atomization of viscoelastic liquids: experiment and modeling[J]. *Journal of Fluids Engineering-Transactions of the ASME*, 2008: 130(6): 061303-1-061303-10.
- [16] Chin J S, Lefebvre A H. A design procedure for effervescent atomizers[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 1995, 117(2): 266-271.
- [17] Wade R A, Weerts J. M, Sojka P E, et al. Effervescent atomization at injection pressures in the MPa range[J]. *Atomization and Sprays*, 1999, 9(6): 61-667.



刘猛

收稿日期: 2011-05-10。

作者简介:

刘猛(1983), 男, 博士后, 研究方向高黏度浆体输送、雾化及燃烧, lmubear@163.com;

段钰锋(1963), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为洁净煤发电、大气污染控制, yfduan@seu.edu.cn。

(责任编辑 王庆霞)