

新型扇形雾化喷嘴的实验研究

周俊虎, 周林华, 杨卫娟, 卢志民, 刘建忠, 岑可法

(浙江大学能源清洁利用国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

摘要: 在对 Y 型喷嘴结构和雾化机理研究分析的基础上, 设计了一种新型的扇形雾化喷嘴, 并对该喷嘴进行了实验研究. 实验测量了不同气、液压力下扇形雾化喷嘴的流量、雾化角和索特尔平均粒径及其在空间上的横向和纵向分布. 通过对液流量用 Y 型喷嘴设计公式进行拟合, 得到了公式中适合扇形雾化喷嘴设计的系数取值: $\mu=0.39$, $\beta=0.98$. 喷雾雾化角 α 大约在 $90^\circ\sim 98^\circ$ 之间, 变化不大. 喷雾的索特尔平均粒径在空间横向呈类似“W”的分布, 在空间纵向呈逐渐降低并趋于稳定的分布.

关键词: 扇形; 液体雾化; 喷嘴; 液滴粒度分布

中图分类号: TQ027.3⁺2

文献标识码: A

文章编号: 1009-606X(2007)04-0652-05

1 前言

液体雾化是农业生产、能源利用和环境工程等领域中普遍存在的过程, 在干燥、粉末冶金、航空航天等领域都有广泛的应用. 在过去的几十年里, 人们对各种不同的液体雾化方法进行了广泛的实验与理论研究, 并研制开发出了各种不同结构和用途的喷嘴^[1-5]. 目前普遍应用的液体雾化喷嘴有机械式喷嘴、Y 型喷嘴、旋转式喷嘴、组合式喷嘴等几种. 其中 Y 型喷嘴由于结构简单、加工方便、气耗率低、雾化质量好等诸多优点, 更是得到了广泛的应用.

鉴于 Y 型喷嘴的优点, 在对其结构及雾化机理进行研究分析的基础上^[8-11], 本工作设计了一种新型的扇形雾化喷嘴, 它与一般 Y 型喷嘴结构上的不同之处就是在喷嘴出口处加了一个橄榄形的整流槽.

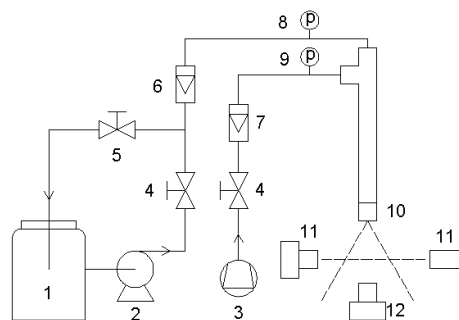
由于气液两相流喷嘴的雾化机理十分复杂, 目前还没有建立十分成熟的理论体系. 影响喷嘴雾化效果的因素也很多, 因而对喷嘴进行实验研究是十分必要且相当有效的一种手段. 本工作对这种扇形雾化喷嘴的气液流量特性、雾化粒度及其空间横向纵向分布、喷雾雾化角等进行了实验研究. 实验证明该结构的扇形雾化喷嘴不仅具有 Y 型喷嘴的一般优点, 而且由于其出口喷雾特殊的扁平扇形形状, 更有利于流体间的混合, 因而特别适合小股流体与主射流的交叉混合等场合.

2 实验

2.1 实验系统

冷态雾化实验台系统的结构如图 1 所示, 主要由空气压缩机、水泵、储水罐、阀门、流量计、压力表、喷

枪、激光粒度测量系统等组成. 实验系统中以水作为被雾化介质, 用压缩空气作为雾化介质. 水和压缩空气的压力和流量用旁路阀和调节阀调节控制. 考虑到管路中存在的压力损失, 将压力表安装在喷枪入口处, 测量喷枪入口前水和压缩空气的压力. 水和压缩空气的流量用玻璃转子流量计测量. 喷雾的雾化粒度用上海理工大学开发的 LS-2000 分体式激光喷雾粒度分析仪来测量, 测量范围 $0.5\sim 1000\ \mu\text{m}$.



- 1. Water container
- 2. Compressed water pump
- 3. Air compressor
- 4. Control valve
- 5. By-pass valve Liquid
- 6. Liquid flowmeter
- 7. Gas flowmeter
- 8. Liquid manometer
- 9. Gas manometer
- 10. Spray atomizer
- 11. LS-2000 laser particle analyzer
- 12. Digital camera

图 1 实验系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of the experimental system

实验开始时, 分别通入压缩空气和水, 控制调节阀和旁路阀使喷嘴达到预定的工况. 喷雾的雾化角采用数码相机拍照, 再经过进一步处理得到. 喷枪能够上下左右沿着固定支架上的刻度自由移动, 可准确调节激光测量光束和喷嘴出口之间的水平距离和垂直距离, 因而能测量喷雾在不同空间位置测点上的雾化粒度, 得到雾化粒度的空间横向和纵向分布.

收稿日期: 2006-09-27, 修回日期: 2006-11-22

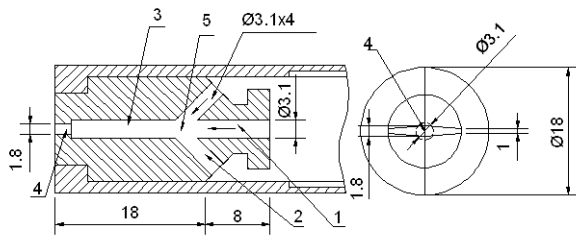
基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)基金资助项目(编号: 2004CB217701)

作者简介: 周俊虎(1962-), 男, 浙江省宁波市人, 博士, 教授, 研究方向为能源高效和洁净利用, E-mail: enejhzhou@public.zju.edu.cn.

2.2 喷嘴结构和尺寸

目前对扇形喷嘴的研究还不多, 没有现成的扇形喷嘴设计经验公式可以直接借鉴, 由于本扇形喷嘴和一般的 Y 型喷嘴相比, 只是在喷嘴出口处多了一个橄榄形的整流槽, 在很大程度上是相似的, 所以在设计扇形喷嘴时选择了 Y 型喷嘴的设计经验公式. 该扇形喷嘴的设计液流量为 150 kg/h.

图 2 为该扇形喷嘴的结构和尺寸示意图, 尺寸单位为 mm. 水和压缩空气分别从液体通道和气体通道进入. 液体通道和气体通道成 45° 的夹角, 液体通道位于喷嘴中心位置, 4 个气体通道呈中心对称分布. 水和压缩空气在混合点相遇后, 开始进入混合段相互冲击混合, 并发生强烈的能量交换和动量交换, 当到达喷嘴出口时, 水已经基本被压缩空气雾化成液滴. 气液混合流在喷嘴出口处受到整流槽限制而挤压变形, 最终被整流成扁平的扇形喷雾形状. 喷嘴的整流槽还设有 120° 的导流角, 一方面有利于气液混合流的进一步膨胀扩张, 另一方面可以限定喷雾的雾化角. 因喷嘴出口槽的形状与橄榄叶相似, 故称为橄榄形喷嘴.



1. Liquid passage 2. Pressurized air passage 3. Mixing sector
4. Outlet of atomizer 5. Mixing point

图 2 橄榄形喷嘴结构示意图
Fig.2 Configuration of the olive-shaped spray atomizer (mm)

3 实验结果和数据分析

3.1 喷嘴的流量特性

图 3 为橄榄形喷嘴的气流量 Q_g 和液流量 Q_l 与液压 p_l 之间的变化关系曲线. 实验时通过保持气压不变, 调节液压来达到预定工况. 液压的变化范围 0.20~0.55 MPa, 液流量的变化范围 60~200 kg/h.

利用实验数据绘制液流量随液压的变化曲线, 并采用 Y 型喷嘴的液流量计算公式对该流量曲线进行拟合, 拟合公式^[2]如下:

$$Q_l = 3600\mu F_2 \sqrt{2\rho_0 \Delta p}$$

其中, F_2 为液体通道的横截面积, $\Delta p = p_l - p_m$, 其中 p_l 为喷嘴液体通道入口处的压力, p_m 为混合点(气液相遇并开始混合的点, 见图 2)的压力, p_g 为为喷嘴气体通道

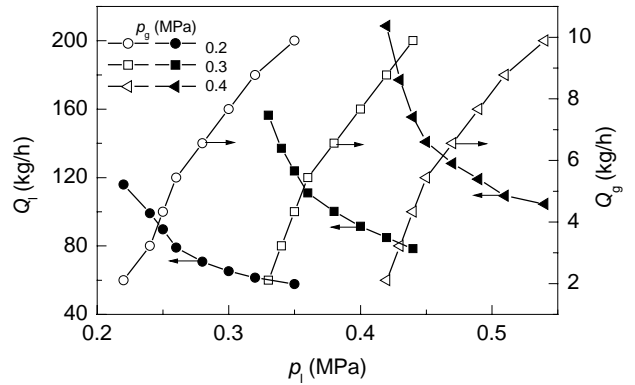


图 3 气液质量流量与液压的关系
Fig.3 Effect of liquid pressure on the mass flowrates of liquid and pressurized air

入口处的压力. 为了反映混合前后通道内压力的变化, 定义 $p_m/p_g = \beta$, 这样就有 $\Delta p = p_l - \beta p_g$. ρ_0 为流体的密度, μ 为喷嘴的流量系数, 反映喷嘴的结构尺寸和流量之间的关系, 取决于喷嘴的结构特性. 设计 Y 型喷嘴时推荐值为 $\mu = 0.7$, $\beta = 0.94$.

根据流量曲线拟合得到扇形喷嘴的流量系数 μ 为 0.35~0.42, 推荐值为 0.39, β 的推荐值为 0.98. 拟合得到的 μ 值与 Y 型喷嘴的推荐值有较大差异, 这是整流槽对扇形喷嘴流量特性的影响造成的. 而 β 值相近, 说明在混合点之前两种喷嘴的压力变化特性相似, 受整流槽的影响较小. 用拟合得到的系数值重新计算液流量 Q_l , 比较发现, 当液流量在设计流量附近时, 计算值与实际值之间的误差很小, 在 $\pm 5\%$ 之间; 当液流量较高时, 两者之间的误差在 $\pm 10\%$ 之间; 当液流量较低时两者之间误差在 $\pm 20\%$ 之间, 如图 4 所示.

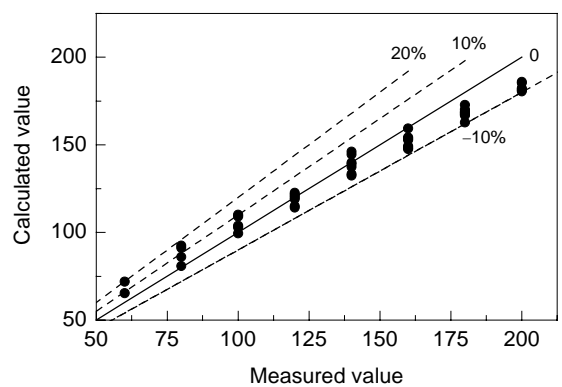


图 4 液体质量流量计算值与实际值的误差
Fig.4 The differences between calculated values and measured values of liquid mass flow rate

通过公式拟合, 得到了适合扇形喷嘴的系数取值范围和推荐值, 比 Y 型喷嘴设计公式的推荐值有了较大的

改进,这对以后设计同类型的扇形喷嘴有一定的实际指导意义。

3.2 气液压对中心雾化粒度的影响

喷雾中液滴的大小分布是不均匀的,常用液滴的某个平均粒径作为指标,而其中又以索特尔平均直径(Sauter Mean Diameter, SMD)的使用最为广泛^[6,7]。

喷嘴的中心雾化粒度指的是在位于喷雾的中心,距喷嘴出口 200 mm 的测点所测得的 SMD 值。扇形喷嘴的液压和气压变化对中心雾化粒度都有影响,用气耗率来同时包含气压和液压对中心雾化粒度的影响,指某个工况下气体质量流量和液体质量流量之比,用 k 表示。

从图 5 可以看出,当气流量很小、液流量较大时,气耗率 k 较低,这时机械雾化起主导作用, SMD 较大,接近 150 μm 。当液流量减少、气流量增加时,气耗率 k 变大,使 SMD 下降,这说明喷嘴的气耗率低,雾化质量好。当喷嘴气耗率 $k > 10\%$ 时,气流量很大,液流被压缩空气冲击撕碎直至完全雾化,这时 SMD 趋向于 20 μm 左右,并且不再继续下降。

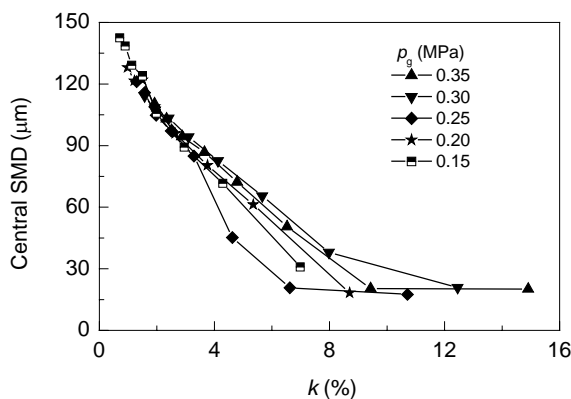


图 5 中心雾化粒度与气耗率的关系

Fig.5 Effect of the mass ratio of air/liquid on the central Sauter mean diameter (SMD) of spray

3.3 气液压对喷嘴雾化角的影响

喷雾雾化角是表征喷雾扩张程度的量。在喷嘴出口处,作喷雾边界的切线,2根切线的夹角即为出口雾化角 α ^[7]。本实验采用数码相机拍照,再对照片进行处理得到雾化角。

从图 6 可看出,喷雾雾化角 α 随工况变化并不发生大的变化,只是在很小的范围内波动。扇形喷雾面方向 $\alpha=90^\circ\sim 98^\circ$,垂直于扇形喷雾面方向 $\alpha=14^\circ\sim 16^\circ$,本工作只研究扇形喷雾面方向的雾化角。可以看出,扇形雾化喷嘴的雾化角 α 较大,喷雾的覆盖面积广,且雾化角受工况变化的影响比较小,主要是由喷嘴自身的结构尺寸决定。

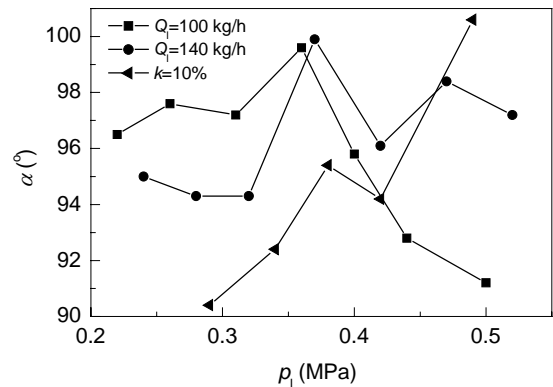


图 6 喷雾雾化角和液压的关系

Fig.6 Effect of liquid pressure on the atomizing angle of spray

3.4 喷嘴的横向雾化粒度分布图

在实际的工程应用中,喷嘴的雾化质量不但取决于喷嘴喷雾的平均雾化粒度的大小,还与雾化粒度的空间分布有很大的关系。雾化粒度满足一定规律的空间分布,可能更有利于雾化之后的过程。

垂直于扇形喷雾面方向的雾化角只有 $14^\circ\sim 16^\circ$ 左右,因此,本工作不研究该方向的横向粒度分布和纵向粒度分布。

本实验的横向雾化粒度分布指的是将距喷嘴出口 200 mm 的喷雾中心位置作为第一个测点,再向它的两边每隔 20 mm 设一个测点得到的雾化粒度分布,横向测点距离喷雾中心的距离用 D_h 表示。实验测量的是液流量 $Q_l=140\text{ kg/h}$ 保持不变的情况下,改变气压和液压,从而改变气耗率 k 而得到的一系列工况。

从图 7 可以看出,喷雾中心位置的液滴比较粗, SMD 最大,往两边随着与中心测点的距离 D_h 增加,液滴变细, SMD 减小,但接近喷雾边缘的测点的 SMD 又有所增加,这样在 SMD 最小处形成一个下凹,整个 SMD 的分布呈类似“W”的形状。随着气耗率 k 的增加, SMD 变小,雾化粒度分布整体下降,且下凹处变得更为突出。

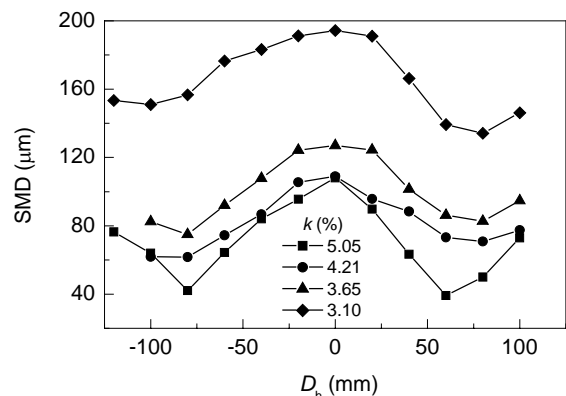


图 7 雾化粒度的横向分布

Fig.7 Droplet size distributions of spray in transverse direction

根据液膜不稳定波动及气动力雾化等理论可推测, 在 Y 型喷嘴混合孔的起始段, 液体是被压缩空气挤压成薄膜紧贴在内壁, 气液两相呈典型的环状流, 并在两相界面上发生剧烈的动量与能量交换. 在到达喷嘴出口时, 液膜在非稳态空气扰动波的作用下破碎成液滴, 因而最终出口的喷雾是边缘的雾化粒度比内部的大. 但扇形喷嘴在出口处还要经过整流槽的整流, 使原来与 Y 型喷嘴类似的混合流受到较大的挤压变形, 并使 SMD 分布发生了较大变化, 最终成为类似“W”的形状.

3.5 喷嘴纵向雾化粒度分布

喷嘴的纵向粒度分布指的是将位于喷雾的中心位置距离喷嘴出口每 50 mm 设为一个测点得到的喷嘴雾化粒度分布, 纵向测点距喷口的距离用 D_v 表示. 实验测量的是液流量 $Q_l=140$ kg/h 保持不变的情况下, 改变气压和液压, 从而改变气耗率 k 而得到的一系列工况.

从图 8 可以看出, 当距离喷嘴出口较近时, 由于液滴还没有完全雾化, 液滴较粗, SMD 较大, 随着 D_v 的增加, 液滴进一步被压缩空气雾化, 使 SMD 变小, 当 $D_v>300$ mm 时, 液滴已经完全雾化, SMD 趋于稳定, 大约在 100 μm 左右. 另外还可以看出, 纵向雾化粒度最终稳定在 100~130 μm 之间. 这样粒径范围的液滴既能较快地与其他射流混合, 又能有较远的穿透距离, 整体效果好.

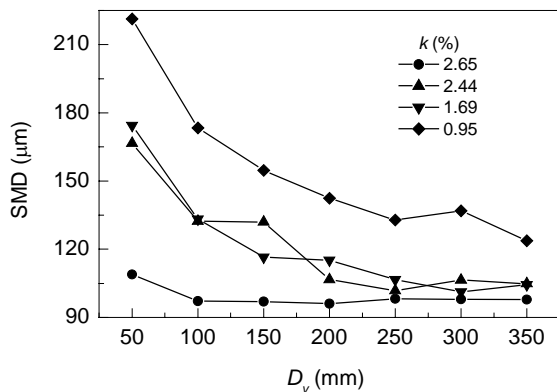


图 8 雾化粒度的纵向分布

Fig.8 Droplet size distribution of spray in axial direction

4 结论

(1) 根据实验数据拟合液流量和液压的关系曲线, 得到喷嘴设计公式中的流量系数 μ 为 0.35~0.42, 推荐值

为 0.39, β 推荐值为 0.98. 当液流量在喷嘴设计流量附近时, 计算值与实际值之间的误差在 $\pm 5\%$ 之间; 当液流量较高时, 误差在 $\pm 10\%$ 之间; 当液流量较低时误差较大, 在 $\pm 20\%$ 之间.

(2) 固定气压下, 当气耗率很小时, 喷雾中心的 SMD 接近 150 μm ; 随着气耗率的增加, 喷雾中心的 SMD 逐渐降低, 并稳定在 20 μm 左右. 说明喷嘴气耗率低, 雾化质量好.

(3) 喷雾雾化角 α 随工况变化并不发生大的变化, 只是在小的范围内波动. 扇形喷雾面方向的雾化角大都在 $90^\circ\sim 98^\circ$ 之间.

(4) 喷雾的横向 SMD 分布呈类“W”形状. 随着气耗率的增加, SMD 分布整体下降, 最大和最小 SMD 的差距变大, 下凹处变得更突出, SMD 趋向更加明显的类“W”分布. 纵向 SMD 随着距喷口距离的增加而下降, 当距离大于 300 mm 时, SMD 稳定在 100 μm .

(5) 扇形雾化喷嘴的结构简单、加工方便; 雾化质量高, 能把液体雾化到粒径为 150 μm 以内的细液滴; 雾化角大, 喷雾覆盖面积广; 气耗率低, 能节约运行成本, 是一种性能优越的喷嘴, 有着很好的应用前景.

参考文献:

- [1] 陈斌, 郭烈锦, 张西民, 等. 喷嘴雾化特性实验研究 [J]. 工程热物理学报, 2001, 22(2): 237-240.
- [2] 侯凌云, 侯晓春. 喷嘴技术手册 [M]. 北京: 中国石化出版社, 2002. 1-199.
- [3] Rizk N K, Lefebvre A H. Spray Characteristics of Plain-jet Airblast Atomizers [J]. J. Eng. Gas Turbines Power, 1984, 106(3): 634-638.
- [4] Lefebvre A H. Energy Considerations in Twin-fluid Atomization [J]. J. Eng. Gas Turbines Power, 1992, 114(1): 89-96.
- [5] 龚景松, 傅维德. 一种新型喷嘴的提出及其流量特性的研究 [J]. 工程热物理学报, 2005, 26(3): 507-510.
- [6] 秦军, 陈谋志, 李伟锋, 等. 双通道气流式喷嘴加压雾化的实验研究 [J]. 燃烧科学与技术, 2005, 11(4): 384-387.
- [7] 秦裕琨. 燃油燃气锅炉实用技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2001. 34-79.
- [8] Mullinger P J. The Design and Performance of Internal Mixing Multi-jet Twin Fluid Atomizers [J]. J. Inst. Fuel, 1974, 47: 251-261.
- [9] 章明川, 吕勇. Y 型喷嘴内部气液两相流动及液膜雾化的数学模型 [J]. 燃烧科学与技术, 2000, 6(3): 205-209.
- [10] Takeshi Sakai. Mean Diameters and Drop Size Distribution of Suspension Sprays [J]. Atomization Spray Technol., 1985, 1: 147-164.
- [11] 李广军, 王新军, 向宇, 等. 燃油喷嘴气液两相流雾化特性实验研究 [J]. 热能动力工程, 1999, 14(82): 253-256.

Experimental Study on a New-type of Fan-shaped Spray Atomizer

ZHOU Jun-hu, ZHOU Lin-hua, YANG Wei-juan, LU Zhi-min, LIU Jian-zhong, CEN Ke-fa

(State Key Laboratory of Clean Energy Utilization, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

Abstract: Based on the study and analysis of Y-shaped atomizers and their atomization mechanism, a new-type of fan-shaped spray atomizer is developed and experimentally studied. The flowrate, atomizing angle and Sauter mean diameter (SMD) in the center of spray under different air and liquid pressures, and the SMD spatial distribution of certain working conditions in transverse and axial directions are investigated. By fitting liquid flowrates with equation of Y-shaped atomizer, the values of coefficients suitable for fan-shaped atomizers are obtained, $\mu=0.39$, $\beta=0.98$. The atomizing angle α is approximately between 90° and 98° and varies within narrow limit. The droplet size distribution of spray in transverse direction is in a “W” shape, and in axial direction the SMD decreases gradually and becomes steady eventually.

Key words: fan-shaped; liquid atomization; atomizer; droplet size distribution