

压力式螺旋型喷嘴雾化特性实验研究

刘乃玲¹, 张 旭²

(1. 山东建筑大学 热能工程学院, 山东 济南 250014; 2. 同济大学 机械工程学院, 上海 200092)

摘 要: 液体雾化是两相流研究中非常重要的课题, 在能源动力及环境工程中具有广泛的应用, 进行系统的研究具有重要意义。螺旋型喷嘴是压力式的一种, 能提供细密的液雾, 用途比较广泛。本文用因次分析的方法建立了螺旋型喷嘴液滴直径的准则关系式, 用最小二乘法回归了 TF 型喷嘴雾化粒子几种直径(D_{32} 、 $D_{0.1}$ 、 $D_{0.5}$ 、 $D_{0.9}$)的经验公式。结果表明, 回归的经验公式具有比较好的相关性, 可以通过它们预测喷嘴出口粒子的直径, 并为螺旋型喷嘴的设计及应用提供理论依据。

关 键 词: 螺旋型喷嘴; 雾化特性; 雾化相似准则; 经验公式

中图分类号: TK121; TK401 文献标识码: A

1 引 言

液体雾化是一个典型的多相流与传热传质学的课题。喷嘴是使液体雾化重要装置, 在工业锅炉、燃气轮机等燃烧设备以及大型火力发电厂的尾气脱硫、煤尘抑制等工艺中都有着广泛的应用^[1-2]。螺旋型喷嘴属于直接压力式的一种, 与一般的雾化喷嘴相比, 能提供细密的液雾, 具有独特的优点。近年来许多学者对喷嘴的液滴分布特性及应用进行了相关的研究^[1-3]。目前对螺旋型喷嘴雾化特性的研究还比较少。TF 型喷嘴是典型的螺旋型喷嘴, 它不但具有细密的雾化效果, 而且可选择的喷雾角范围较宽, 在烟气脱硫等工艺中被广泛地应用。因此, 本文对 TF 型喷嘴进行的实验研究具有重要意义。

2 液滴的表征参数及喷雾特性

2.1 雾滴表征参数

喷嘴喷雾经初级和二级雾化^[3], 形成大量液滴。严格地说, 从喷嘴喷出的液滴形状不全是球形的, 并且尺寸也大小不一。为了定量评价喷雾液滴直径的分布情况, 需要采用反映全部液滴粒度大小的特征参数作为评价的指标。描述液滴粒度大小的特征参

数通常有两种^[3]: 平均直径和特征直径。在平均直径中常用的是 D_{32} , 在特征直径中具有代表性的是 $D_{0.1}$ 、 $D_{0.5}$ 、 $D_{0.9}$ 。它们的含义如表 1 所示。

表 1 液滴直径及其含义

符号	含 义
D_{32}	全部液滴的总体积与总表面积之比
$D_{0.1}$	小于该直径的所有液滴体积占全部液滴总体积的 10%
$D_{0.5}$	小于该直径的所有液滴体积占全部液滴总体积的 50%, 该直径左右侧体积分布曲线下的面积相等
$D_{0.9}$	小于该直径的所有液滴体积占全部液滴总体积的 90%

从表 1 可以看出, 平均直径与特征直径的含义不同, 它们从不同的侧面反映了液滴谱的分布特性。本文以 D_{32} 、 $D_{0.1}$ 、 $D_{0.5}$ 、 $D_{0.9}$ 为分析对象, 对螺旋型喷嘴的雾化特性进行实验研究, 以拟合出它们的经验公式。

2.2 喷嘴雾化特性

根据螺旋型喷嘴的雾化机理及结构特点可知^[5-6], 对雾化液滴的平均直径分布具有显著影响的因素主要有: 喷嘴直径、喷雾压力、液体的表面张力系数、空气的密度、液体的粘性系数、液体的密度等。其中, 压力的变化最终引起的是喷雾速度的变化, 因此以液滴的直径 D_m 及主要独立因素写出不定函数式为:

$$D_m = f(d_0, v_R, \sigma, \rho_a, \mu, \rho_l) \quad (1)$$

式中: d_0 —喷嘴的喉部直径, m; v_R —液滴与气流的相对速度, m/s; σ —液滴的表面张力系数, N/m; ρ_a —空气的密度, kg/m^3 ; μ —液体的动力粘滞系数, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; ρ_l —液体的密度, kg/m^3 。

根据以上分析, 利用因次分析方法, 可以发现对于以水为雾化介质的雾化现象的无因次量群可以表示为:

$$\Pi = d_0^a v_R^b \sigma^c \rho_a^d \mu^e \rho_l^f \quad (2)$$

其因次关系为:

$$[\Pi] = [L]^a [LT^{-1}]^b [MT^{-2}]^c [ML^{-3}]^d [ML^{-1}T^{-1}]^e [ML^{-3}]^f \quad (3)$$

由于 Π 的因次为零, 故对于 $[L]$ 有:

$$a + b - 3d - e - 3f = 0 \quad (4)$$

对于 $[T]$ 有:

$$-b - 2c - e = 0 \quad (5)$$

对于 $[M]$ 有:

$$c + d + e + f = 0 \quad (6)$$

式(4)~式(6)中有 6 个未知数, 可以有无数组不同的解, 但能构成独立的准则数的解只有两组, 即 $a = 1; b = 2; c = -1; d = 1; e = 0; f = 0$ 时, 所表示的准则数为:

$$\Pi_1 = \frac{\rho_a v_R d_0}{\sigma} = We \quad (7)$$

$a = 1; b = 1; c = 0; d = 0; e = -1; f = 1$ 时, 所表示的准则数为:

$$\Pi_2 = \frac{\rho_1 v_R d_0}{\mu} = Re \quad (8)$$

当然式(4)~式(6)还有很多组其它的解, 但它们都不能构成独立的准则数, 因而没有明显的物理意义, 所以应该删去而不予讨论。

因此对于压力式雾化喷嘴的液体雾化有下列形式的函数关系(因变量应无量纲参数, 以颗粒的平均直径与喷嘴出口直径的比值表示):

$$D_m / d_0 = f(We, Re) \quad (9)$$

由于各种现象的经验公式在自变量的某一范围内往往可以表示成幂函数的形式, 因此式(9)可以表示为:

$$D_m / d_0 = C We^m Re^n \quad (10)$$

式中: C —系数; m, n —指数。 C, m, n 需通过实验并进行拟合后确定。

3 实验系统

实验装置如图 1 所示。本实验以水为雾化介

质, 喷雾压力由高压水泵提供, 所需的压力通过调节水泵出口处两个阀门的开度来控制, 该系统可以方便地对喷嘴的雾化特性进行实验研究。压力值由 0.4 级的标准压力表测量; 粒径的分布采用马尔文粒度分析仪来测量。

本文主要对工程中常用的 TF 系列喷嘴的雾化特性进行实验研究。TF 系列喷嘴是典型的螺旋型喷嘴, 它不但具有细密的雾化效果,

而且可选择的流量范围及喷雾角范围较宽, 在工程中被广泛地应用。如: 清除大型火力发电厂 SO_2 尾气、抑制煤尘及其它灰尘、控制火灾等领域都被大量使用。TF 型喷嘴的外形及结构示意图

如图 2 所示。该种喷嘴内部结构比较简单, 上半部分内部只是一个空腔, 没有任何内部构件, 下半部分是一个如图所示的螺旋体。其工作原理是: 液体在喷雾压力的作用下, 与一系列连续变小的螺旋线体相切使液体变成小液滴喷出, 因此螺旋型喷嘴的喷雾区域是由一系列连续的同心圆空心锥组合而成的实心锥形雾场。TF 型喷嘴可以用金属或塑料等材料制作, 采用螺纹或法兰等连接方式, 可提供 $60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 150^\circ$ 等不同的喷雾角, 可满足不同工程的需要。

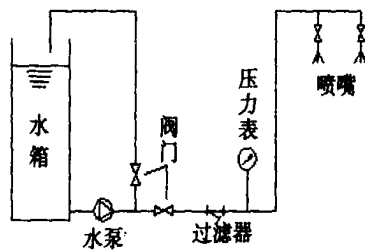


图 1 实验系统示意图

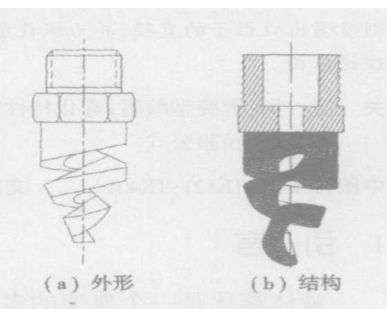


图 2 TF 喷嘴外形及结构示意图

表 2 关联式及回归过程中的相关参数

液滴直径关联式	标准误差	回归平方和	残差平方和	相关系数 R^2
$D_{32} / d_0 = 0.036 We^{-0.39643} Re^{0.13633}$	0.056 6	0.254	0.041 65	0.859 1
$D_{0.5} / d_0 = 0.023 We^{-0.49102} Re^{0.22794}$	0.065 6	0.363 08	0.055 96	0.866 5
$D_{0.1} / d_0 = 0.036 We^{-0.30356} Re^{0.051697}$	0.071 17	0.169 98	0.065 85	0.720 8
$D_{0.9} / d_0 = 0.0468 We^{-0.50147} Re^{0.222085}$	0.069 35	0.382 89	0.062 51	0.859 6

4 液滴直径经验公式的拟合

拟合的方法是先对式(10)两边取对数, 再用最小

二乘法借助于计算机将实验数据进行线性回归, 然后计算式(10)中的系数 C 和指数 m, n 。由于在实验时周围空气的流动速度很小, 可以忽略不计, 故本文以

喷嘴的出口速度即射流的轴心速度 v_0 来近似代替 v_R 。 ρ_a 、 σ 、 ρ_l 、 μ 在一定温度下为常数, 实验时空气温度为 $20\text{ }^\circ\text{C}$, 水的温度为 $18\text{ }^\circ\text{C}$, 在此条件下 $\rho_a = 1.2\text{ kg/m}^3$

$\sigma = 0.072\text{ N/m}$, $\rho_l = 998.5\text{ kg/m}^3$, $\mu = 1.059 \times 10^{-3}\text{ Pa}\cdot\text{s}$ 。 回归后各种直径的关联式及回归过程中的相关参数如表 2 所示, 关联式的适用范围见表 3。

表 3 关联式的适用范围

适用范围	d_0/mm	P/MPa	颗粒直径 μm				We	Re
			D_{32}	$D_{0.5}$	$D_{0.1}$	$D_{0.9}$		
适用	2.38~5.08	0.07~8	41~1 800	48~2 600	24~930	84~4 400	29.8~452.7	68 402~705 693

利用以上方法拟合的关系式是在本文实验基础上得到的, 因此对于本文实验研究的这种螺旋型喷嘴, 只要给定主要的结构参数和运行参数, 就可以利用表 2 中的

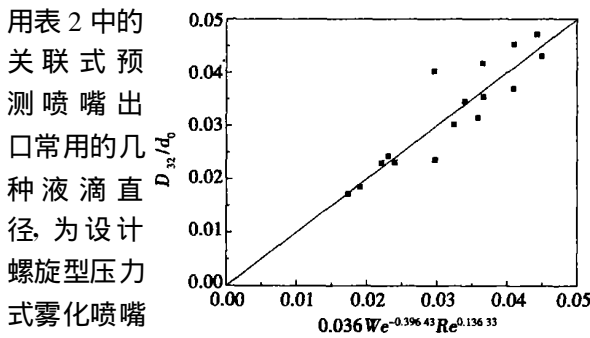


图 3 D_{32} 拟合值与实验值的对比

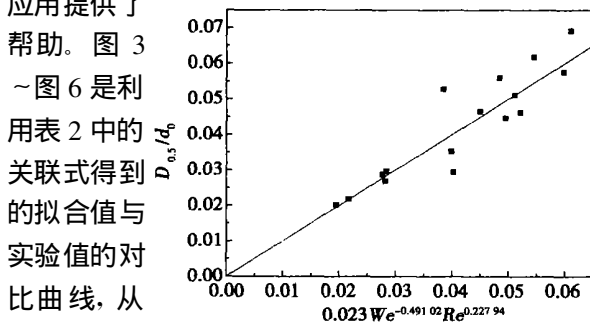


图 4 $D_{0.5}$ 拟合值与实验值的对比

几种液滴直径的拟合值与实验值吻合得比较好。

5 结 论

(1) 螺旋型喷嘴雾化液滴直径的分布主要受喷嘴孔直径、喷雾压力、液体的表面张力系数、空气的密度、液体的粘性系数、液体的密度等参数的影响。根据分析可知, 液滴的直径可以表示成 We 数和 Re 数的函数关系。

滴的几种直径 D_{32} 、 $D_{0.1}$ 、 $D_{0.5}$ 、 $D_{0.9}$ 的经验公式 (见表 2)。经对比分析发现: 拟合值与实验值吻合得比较好, 具有较好的相关性。利用这些关联式可以预测喷嘴出口粒子的直径, 并为螺旋型喷嘴的设计及应用提供理论依据。

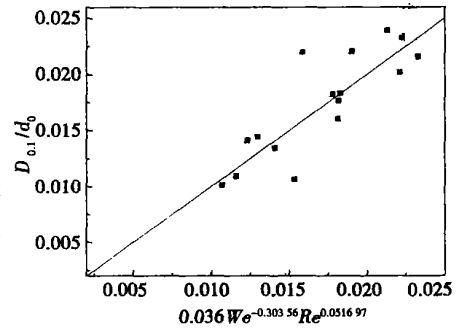


图 5 $D_{0.1}$ 拟合值与实验值的对比

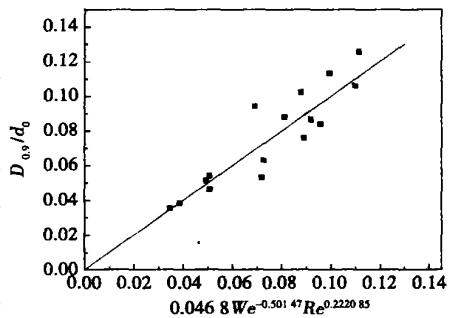


图 6 $D_{0.9}$ 拟合值与实验值的对比

参 考 文 献:

- [1] 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(3): 253-256.
- [2] 李兆东, 王世和, 王小明. 湿法烟气脱硫旋流喷嘴雾化特性研究[J]. 热能动力工程, 2006, 21(1): 66-69.
- [3] 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.
- [4] 张征, 樊未军, 杨茂林. 双路离心式喷嘴雾化特性研究[J]. 工程热物理学报, 2003, 24(1): 153-156.
- [5] LEFEBVRE A H. Atomization and sprays[M]. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1989.
- [6] 刘乃玲, 张旭. 压力式细雾喷嘴雾化特性的研究[J]. 同济大学学报, 2005, 33(12): 1677-1679.

(辉 编辑)

对喷流除尘性能影响因素的正交实验研究 = An Orthogonal Experimental Study of Factors Affecting Dust Removal Performance by Counter Jet Flows [刊, 汉] / ZHANG Ming-xing, CHEN Hai-yan, YAN Cui-ping, et al (Environment and Resource College under the Southwest University of Science and Technology, Mianyang, China, Post Code: 621010) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(5). — 500 ~ 504

A decrease in dust removal efficiency may be caused by the use of a horizontal type counter jet-flow structure, resulting in a portion of dust particles being adhered to equipment walls opposite to spray nozzles. To cope with the above problem, an inclined-type counter jet flow-based dust removal technique was adopted to collect dust particles of the ammonium sulfate and ammonium nitrate mixture with an orthogonal table $L_{16}(4^5)$ being utilized to optimize experimental parameters. Investigations were performed at four levels of magnitude respectively for the five main parameters affecting the dust removal performance, namely, nozzle velocity, dust-laden concentration, horizontal spacing of nozzles, inclination angle and water consumption of atomized water spray for moistening dust-laden gas flows. As a result, an optimum scheme was identified as follows: nozzle velocity 25 ~ 27 m/s, dust-laden concentration 0.55 ~ 0.65 kg/m³, spacing of spray nozzles 0.2 ~ 0.25 m, inclination angle 40 ~ 60 degrees and water consumption 0.21 ~ 0.25 kg for each kilogram of dust. The experiments have proved that the dust removal efficiency under the above condition can attain a maximum of 98.6% and the moistening of dust-laden gas flow by spraying atomized water has the greatest impact on the dust removal efficiency. Through observations, it has been found that the inclined-type counter jet flow can effectively avoid the adhesion of dust particles on the equipment wall surfaces. **Key words:** counter jet flow for dust removal, dust removal efficiency, influencing factors, orthogonal experiment, inclination type

压力式螺旋型喷嘴雾化特性实验研究 = An Experimental Study of Pressure-type Spiral Nozzle Atomization Characteristics [刊, 汉] / LIU Nai-ling (Thermal Energy Engineering College under the Shandong Architectural Engineering University, Jinan, China, Post Code: 250014), ZHANG Xu (Mechanical Engineering College under the Tongji University, Shanghai, China, Post Code: 200092) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(5). — 505 ~ 507

Liquid atomization represents a most important scientific issue playing a key role in the study of two-phase flows. Being widely used in energy and power supply units as well as in environmental engineering projects, it is of major significance to conduct a systematic study of the liquid atomization. A kind of pressure type nozzles, the spiral nozzles can provide a fine and dense liquid mist and have found relatively widespread applications. A criterion relationship featuring the liquid droplet diameters of spiral nozzles has been established by using a dimensional analytic method. An empirical formula applicable to several kinds of diameters (D_{32} , $D_{0.1}$, $D_{0.5}$, $D_{0.9}$) of TF-type nozzle atomized particles were regressed by utilizing a least square method. The results show that the empirical formula thus regressed is characterized by a comparatively good correlation. Through the formula one can predict the diameters of particles at the nozzle outlet, thus providing a theoretical basis for the design and application of spiral type nozzles. **Key words:** spiral type nozzle, atomization characteristics, atomization similarity criterion, empirical formula

脉冲流光电晕放电反应器中二次流光能量的研究 = A Study of the Secondary Streamer Energy in a Pulse-streamer Corona-discharge Reactor [刊, 汉] / DONG Bing-yan, XIE Wen-juan, ZHANG Da-chao (Environmental and Architectural Engineering College under the Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou, China, Post Code: 341000), WU Yan (Electrostatic and Special Power Source Research Institute under the Dalian University of Science and Technology, Dalian, China, Post Code: 116024) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(5). — 508 ~ 511

An experimental study was conducted of the impact of the wire-wire spacing, wire-plate spacing, pulse-formation capacitance and primary voltage of a wire-plate type pulse-streamer corona-discharge reactor on secondary streamer energy and