



压力型雾化喷嘴射流喷雾气-液两相流数值模拟

梁 钦, 高贵军, 刘邱祖

(太原理工大学 a. 机械工程学院; b. 山西省矿山流体工程实验室(研究中心), 山西 太原 030024)

摘要: 为了研究喷雾压力和环境气流速度对射流喷雾的雾化效果及喷雾雾场的均匀性的影响, 基于流体力学理论, 建立压力型喷嘴喷雾的数值计算模型, 利用计算流体动力学软件 Fluent 对喷雾雾场进行气-液两相流数值模拟研究, 并通过大量的数据统计定量分析雾滴粒径的分布情况。结果表明: 在喷射压力一定时, 风速越大雾滴飘移能力越强, 风速过大或过小都将严重影响雾化雾场的均匀性; 在一定范围内喷射压力越大, 雾化效果越好, 所形成的雾滴平均粒径越小。

关键词: 气-液两相流; 喷嘴雾化; 喷雾雾场; 雾滴粒径; 数值模拟

中图分类号: TQ021.1

文献标志码: A

文章编号: 1008-5548(2015)02-0005-05

Numerical Simulation on Gas-Liquid Two Phase Flow of Pressure Atomization Nozzle Jet Spraying

LIANG Qin, GAO Guijun, LIU Qiuzu

(a. College of Mechanical Engineering; b. Shanxi Provincial Engineering Laboratory (Research Center) for Mine Fluid Control, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: To study the effect of spray pressure and air velocity on the jet spray atomization and spray field uniformity, a numerical calculation model of pressure nozzle spraying was established based on the fluid mechanics theory. The computational fluid dynamics software Fluent was used to simulate the gas-liquid two phase flow field of jet spraying, and the distribution of droplet size was quantitatively analyzed by counting a lot of data. The results show that at fixed injection pressure, the greater the wind speed is, the stronger the drift ability of droplet is. The wind speed is too large or too small to seriously affect the uniformity of the atomized spray field. In a certain range, the bigger the injection pressure is, the better the atomization is, and the droplet mean diameter is smaller.

Keywords: gas-liquid two phase flow; nozzle atomizing; spray field; droplet size; numerical simulation

收稿日期: 2014-06-23, 修回日期: 2014-07-05。

基金项目: 国家自然科学基金联合基金项目, 编号: U1261107; 山西省自然科学基金基础研究计划项目, 编号: 2012011018-1。

第一作者简介: 梁钦(1987—), 男, 硕士研究生, 研究方向为机电液一体化。E-mail: liangqin5257@163.com。

通信作者简介: 高贵军(1973—), 男, 博士研究生, 副教授, 研究方向为机电液一体化。E-mail: gaogj161@163.com。

随着煤炭开采技术的迅速发展, 尤其是高效综采综掘工作面的广泛应用, 矿井产尘量越来越多, 严重威胁井下的安全生产和工人的身体健康^[1]。喷雾降尘具有设备简单、成本低廉等优点, 已成为目前煤矿井下应用最为广泛的降尘方法, 但喷雾雾化效果和捕尘效率仍不能满足煤矿井下降尘的要求, 特别是对于呼吸性粉尘的沉降问题^[2-3]。影响喷雾雾化效果和捕尘效率的主要因素是喷雾雾场的均匀性和雾滴粒径大小。研究者们普遍认为, 雾滴越小对呼吸性粉尘的捕集效果越好, 但是雾滴越小越容易发生飘失现象; 因此, 在保证雾滴飘失率较小的情况下使喷嘴喷出的雾滴粒径越小越好^[4]。喷嘴雾化过程是一个十分复杂的过程, 目前国内外部分学者从气体分子动力学、两相流体力学和数值方法等方面对其进行了研究, 但研究并不成熟^[5-7]。

为了研究不同气流速度和喷射压力下射流喷雾的流场特性, 本文中基于压力型喷嘴的喷雾系统, 建立压力型喷嘴的数值计算模型, 并运用计算流体力学软件 Fluent 对其产生的雾场进行气-液两相流数值模拟研究。

1 数值建模

1.1 几何模型的建立

结合压力型喷嘴的喷雾特点以及为了方便后续实验, 本文中建立如图 1 所示的筒状模型, 其中压力型喷嘴位于上方前部, 右下方设置有集流槽。模型圆筒直径为 1 000 mm, 长度为 1 600 mm, 喷嘴与入风口距离为 280 mm; 设定模型的左端面为自然风的流入界面。

1.2 数学模型的选取

由于压力型喷嘴的喷雾过程是一个气-液两相流相互作用的过程, 其中气相为连续相的空气, 液相为离散相的雾滴, 相对于连续相来说离散相的体积分数非常小, 因此符合 Lagrangian 离散相模型要求。根据喷雾的实际过程和主要的影响因素, 数值仿真中主要用到的计算模型有连续相湍流模型及离散相模型^[8]。

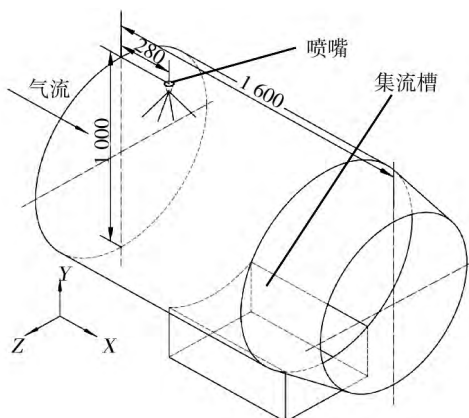


图 1 数值模拟几何模型

Fig. 1 Geometric model for numerical simulation

1) 连续相模型。

连续性方程为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i)}{\partial x_i} = 0, \quad (1)$$

动量方程为

$$\frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho u_i u_j'), \quad (2)$$

式中: ρ 为流体密度, u 为流体相速度, t 为时间, x 为方向, i, j, k 分别为三维坐标系中的坐标方向, μ 为流体动力黏度, δ_{ij} 为单位张量, p 为流体压强。

雷诺应力 $-\rho u_i u_j'$ 采用 Boussinesq 假设, 为

$$-\rho u_i u_j' = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} (\rho \kappa + \mu_t \frac{\partial u_k}{\partial x_k}) \right), \quad (3)$$

标准 κ - ε 模型及其湍动能和耗散率方程^[7]如下:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \kappa) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \kappa u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(u + \frac{u_t}{\sigma_\kappa} \right) \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \right] + G_\kappa + G_b - \rho \varepsilon - Y_m + S_\kappa, \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(u + \frac{u_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{\kappa} (G_\kappa + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{\kappa} + S_\varepsilon, \quad (5)$$

式中: κ 为湍动动能, ε 为湍动动能的耗散率, G_κ 由平均速度梯度引起的湍动能产生, G_b 由浮力影响引起的湍动能产生, Y_m 为可压缩湍流脉动膨胀对总耗散率的影响, $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 、 $C_{3\varepsilon}$ 、 S_κ 、 S_ε 为经验常数, σ_κ 、 σ_ε 为湍动能和湍动耗散率对应的普朗特数。

2) 离散相模型。

在 Fluent 中通过积分拉氏坐标系下的颗粒作用力微分方程来求解离散相颗粒(液滴或气泡)的轨道。其中颗粒作用力平衡方程在笛卡尔坐标系下的形式(沿 x 方向)为:

$$\frac{du_p}{dt} = F_d(u - u_p) + \frac{g_x(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_x, \quad (6)$$

式中: $F_d(u - u_p)$ 为颗粒的单位质量曳力, 且 $F_d = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \cdot$

$\frac{C_d Re}{24}$; u_p 为颗粒速度; ρ_p 为颗粒密度; d_p 为颗粒直径; Re 为相对雷诺数(颗粒雷诺数); C_d 为曳力系数; F_x 为离散相的其他附加力。

颗粒轨道方程是在离散的时间步长上逐步进行积分运算求解的。对于离散相的颗粒轨迹可以通过沿每个坐标方向求解如下方程得到:

$$\frac{dx}{dt} = u_p. \quad (7)$$

对于低韦伯数的射流雾化可以采用 TAB 液滴破碎模型。TAB 模型是计算液滴破碎的经典方法, 可以应用于多种工程射流计算中。其相关方程为

$$\frac{d^2 y}{dt^2} = \frac{C_f}{C_b} \cdot \frac{\rho}{\rho_p} \cdot \frac{u'^2}{r^2} - \frac{C_k \sigma}{\rho_p r^3} y - \frac{C_d \mu_p}{\rho_p r^2} \cdot \frac{dy}{dt}, \quad (8)$$

式中: 液滴变形系数 $y = \frac{x}{C_b r} \geq 1$ 时液滴发生破碎, 其

中 C_b 为无量纲常数, 取值为 0.5; u' 为液滴的相对速度, r 为未发生变形前液滴的半径, σ 为液滴的表面张力, μ_p 为液滴的黏度, C_f 、 C_k 、 C_d 为无量纲常数, 取值分别为 1/3、8、5。

2 模拟计算

2.1 边界条件及参数设置

在 Gambit 2.2.30 中建立如图 1 所示的计算区域并划分网格, 体网格元素(elements)选择 Hex/Wedge, 划分类型(type)选择 Cooper, 网格尺寸(interval size)为 20 mm, 对体进行网格划分, 网格数为 25 347(如图 2 所示)。设置左端面边界类型(type)为速度入口(velocity-inlet), 右边的圆形端面 and 集流槽端面边界类型(type)为出流(outflow), 其他为壁面(wall)。

风机所能产生的最大风速为 15 m/s, 所以本仿真设置风速分别为 1、3、6、9、12、15 m/s, 且假定风速在入口处水平均匀地进入计算区域。图 1 所示的喷嘴处

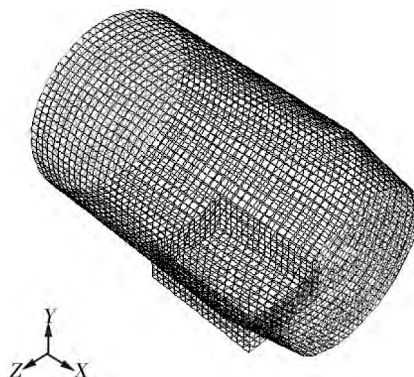


图 2 模型网格

Fig. 2 Grid of model

为雾滴的释放位置,设定雾化模型为压力-旋流雾化 (pressure-swirl atomizer),其相关参数依据经验或理论计算得出。求解器类型选择压力型 (pressure-based),速度属性为绝对 (absolute),时间模式为非稳态 (transient),重力加速度为 Y 向 -9.8 m/s^2 ,湍流模型选择标准 $k-\varepsilon$,操作条件为大气压。数值模拟过程中连续相和离散相的主要参数设定如表 1 所示。

2.2 数值模拟方案设计

本仿真采用正交模拟方案。正交实验方案具有“均匀分散、齐整可比”的特点,是一种高效率、快速、经济的实验设计方法^[9]。在本方案中,因素 A 为流场的入口风速,其取值为 1、3、6、9、12、15 m/s;因素 B 为喷嘴喷射压力,其取值为 1、2、4、6 MPa。本仿真模拟共需进行 24 组计算。

3 模拟结果分析

基于上述数值仿真数据,本文中从以下 2 个方面对喷雾的雾场进行分析:1)定性分析一定喷雾压力下

表 1 连续相和离散相的主要参数设定
Tab.1 Main parameters of continuous phase and discrete phase

项目	参数	参数设置
连续相	速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	1、3、6、9、12、15
	初始压力/MPa	0
	湍流强度/%	10
	水力直径/m	1
	质量流率分数	1
离散相	颗粒流数	100
	质量流率/($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$)	0.1
	喷嘴内径/mm	1
	喷雾半锥角/($^\circ$)	30
	进口压力/MPa	1、2、4、6

不同风速对雾场的影响;2)定量分析不同喷雾压力和风速下雾场的粒径分布。

3.1 一定喷雾压力下风速对雾场的影响

图 3 是喷雾压力为 4 MPa 时不同风速下喷雾雾场

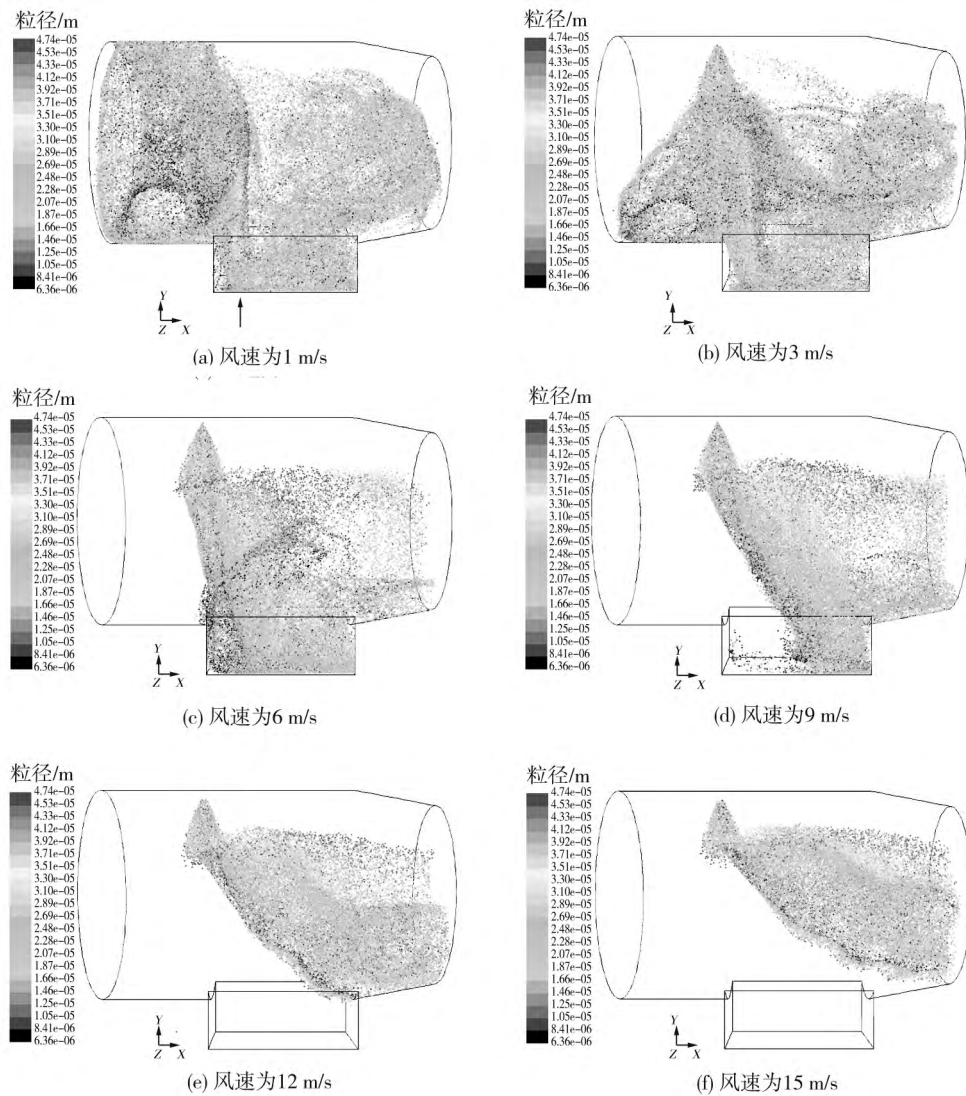


图 3 不同风速下雾场粒子图
Fig. 3 Particle diagram of fog at different wind speeds

的粒子分布图,其中粒子的着色变量为颗粒直径,由蓝色到红色表示的颗粒直径逐渐增大。由图中可以看出:随着风速的越来越大,雾滴的飘移能力越来越强;风速过小(如小于 3 m/s)时,大量雾滴(特别是大粒径雾滴)进入集流槽而被排出;风速过大(如大于 12 m/s)时,雾滴基本全部随风飘走,理论上会严重影响雾化雾场的均匀性。

3.2 不同喷雾压力和风速下雾场的粒径分布

由于喷雾雾场的扩散需要一定的空间和时间,因

此为了接近工况,本节中着重统计喷嘴下风向距喷嘴 1~1.3 m 区间范围内的雾滴个数及粒径,并在 Excel 中对统计数据进行了对比分析。

图 4 所示为喷雾压力为 1 MPa 时不同风速下统计区域内的雾滴粒径分布情况。从图中可以看出,当风速为 1、3 m/s 时统计到的雾滴粒径普遍偏小,定量地说明了当风速较小时大粒径雾滴易进入集流槽而被排出。

图 5 所示为在一定风速(6 m/s)下不同喷雾压力

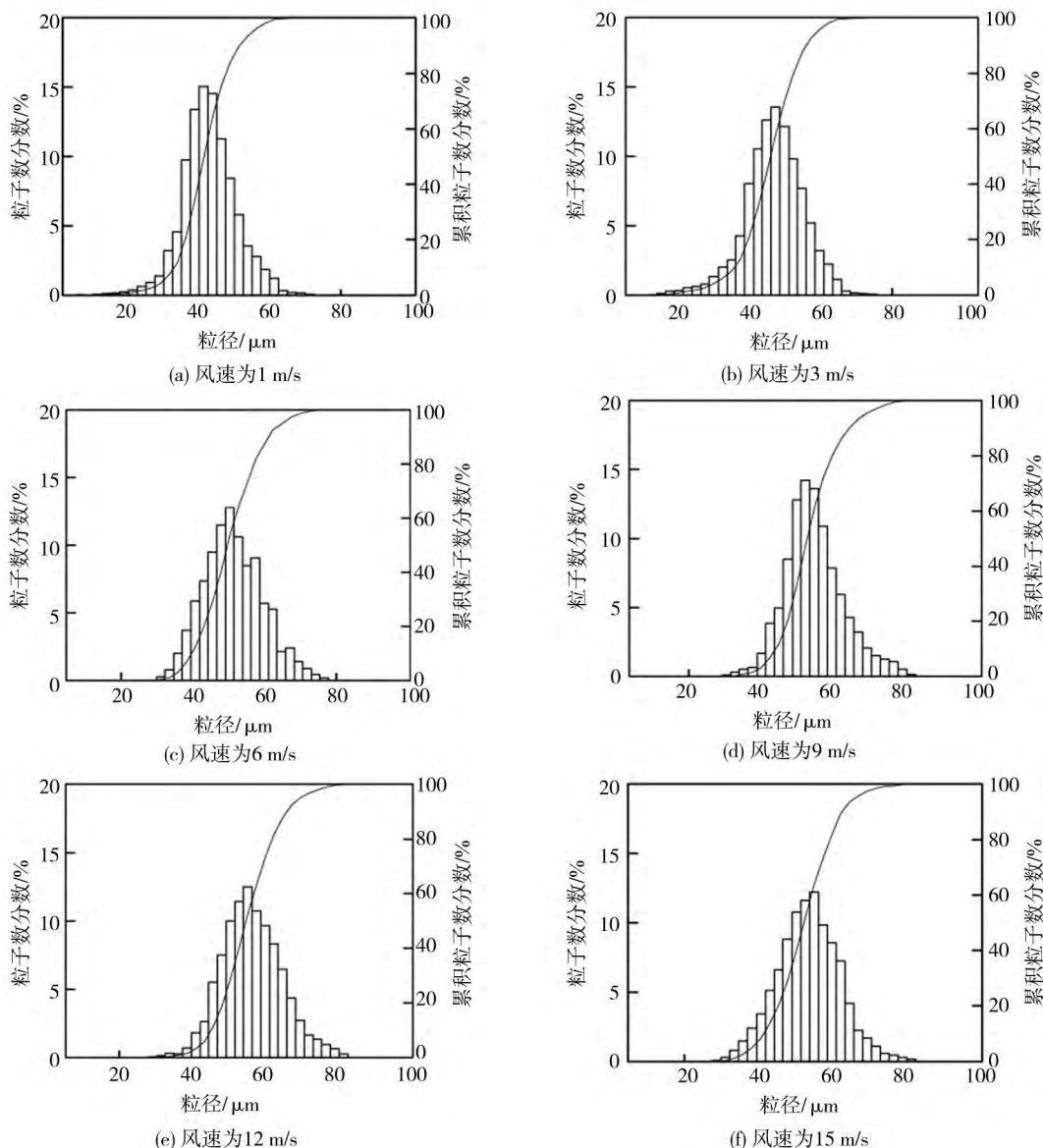


图 4 喷雾压力为 1 MPa 时的雾滴粒径分布情况

Fig. 4 Droplet size distribution at spray pressure of 1 MPa

时统计区域内的雾滴粒径分布对比情况,图 6 所示为不同喷雾压力、不同风速下统计区域内的雾滴平均粒径对比。从图中可以看出,喷雾压力越大,雾滴雾化程度越好,所形成的雾滴平均粒径越小,比如风速为 9 m/s 时,喷雾压力从 1 MPa 增加到 6 MPa,所形成的雾滴平均粒径分别为 52.5、30.4 μm 。

4 结论

1) 利用流体动力学软件 Fluent 对压力型雾化喷嘴进行了不同喷射压力和环境风速的数值计算仿真,得到了在不同条件下的雾场粒子图,并通过 Fluent 的统计功能对喷嘴下风向距喷嘴 1~1.3 m 区间范围内的

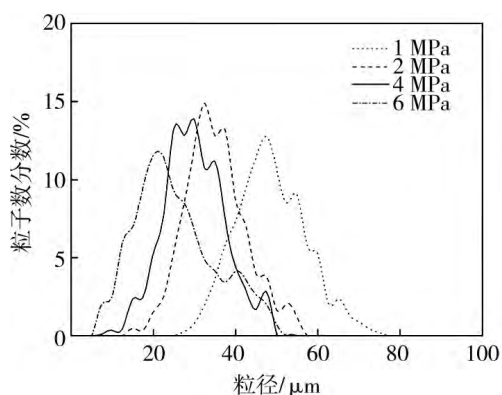


图5 风速为6 m/s时的雾滴粒径分布对比

Fig. 5 Comparison of droplet size distribution at wind speed of 6 m/s

雾滴个数及粒径进行了统计分析。

2)从三维雾场的粒子分布图可以看出:在喷射压力一定时,随着风速的增大,雾滴的飘移能力越来越强;风速过小时,大量雾滴(特别是大粒径雾滴)进入集流槽而被排出;风速过大时,雾滴基本全部随风飘走,严重影响雾化雾场的均匀性。

3)通过对固定区域内大量的雾滴个数及粒径进行统计分析认为,在一定范围内喷射压力越大,越有利于雾化,所形成雾场的雾滴平均粒径越小。

参考文献(References):

- [1] 刘邱祖,韩振南,王志坚,等.呼吸性粉尘润湿机理及润湿剂复配实验研究[J].中国粉体技术,2014,20(2):2-6.
- [2] 程卫民,周刚,左前明,等.喷嘴喷雾压力与雾化粒度关系的实验研

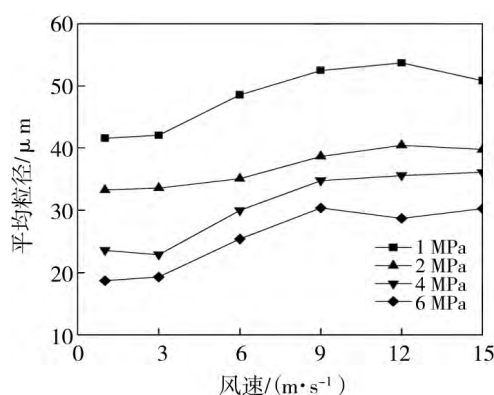


图6 不同条件下雾滴平均粒径综合对比

Fig. 6 Comparison of average droplet size under different conditions

究[J].煤炭学报,2010,35(8):1308-1313.

- [3] 周刚,程卫民,王刚,等.综放工作面粉尘场与雾滴场耦合关系的实验研究[J].煤炭学报,2010,35(10):1660-1664.
- [4] 马素平,寇子明.喷雾降尘机理的研究[J].煤炭学报,2005,30(3):297-300.
- [5] 杨军瑞,胥海伦,陈海焱.新型环形复合喷嘴的数值模拟分析与研究[J].中国粉体技术,2009,15(4):11-14.
- [6] 巴鑫,罗小辉,朱玉泉,等.微重力状态下细水雾雾场特性仿真[J].华中科技大学学报:自然科学版,2011,39(10):6-9.
- [7] 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.
- [8] 朱红钧.FLUENT 流体分析及仿真实用教程[M].北京:人民邮电出版社,2010:106-110.
- [9] 刘瑞江,张业旺,闻崇炜,等.正交试验设计和分析方法研究[J].实验技术与管理,2010,27(9):52-55.

浙江丰利通过省级企业技术中心复评

日前,浙江丰利粉碎设备有限公司企业技术中心,经浙江省经信委、财政厅、国税局、地税局和杭州海关等5部门联合审定,得分高于75分,符合浙江省省级企业技术中心创新能力建设项目申报得分条件,顺利通过复评。据悉,省级企业技术中心评定不仅在企业销售规模等经济指标上设有较高门槛,更注重企业的创新能力、创新示范作用等综合水平,同时要求企业在行业中具有显著的规模优势和竞争优势。省有关部门予以省级认定,并给予相应的政策扶持。

浙江丰利粉碎设备有限公司早在2000年就建成了我国粉体设备行业首家省级重点粉体工程高新技术研发中心,并在每次评价中都顺利通过。公司始终把技术中心建设作为一项战略任务来抓,努力完善公司技术创新机制和组织体系。重视企业科研创新工作,每年均投入销售收入的5%以上作为科研经费。立足粉体技术前沿,紧密跟踪国内外粉体技术发展动态,努力占领行业技术制高点,引领高档粉体设备研发方向。坚持自主创新与引进技术相结合的科研创新体系,创造出多项独有知识产权和国内领先并达到国际先进水平的技术和产品,成功开发出10大类100多个品种的超微粉体设备;其中新一代超微粉碎设备——MTM冲击磨、GJF干燥超微粉碎机等多十项高新技术产品,被国家科技部确认为国家重大产业技术开发专项、国家重点新产品和国家火炬项目,代表着我国高档粉碎设备的最高水平。2014年,又有天然石墨球化设备、白炭黑粉碎机、超细辊压磨、双转子冲击磨、多轮超微分级机、重质碳酸钙干法表面改性设备等11个品种列入浙江省级新产品。

技术中心坚持绿色为先战略,专门成立废弃生物质资源化及装备工程技术中心,运用先进粉体技术进行破解,取得了可喜成果:承担的浙江省重大科技专项——废电器及电子材料综合利用技术及其成套设备,实现了废电器及电子材料综合利用技术的重大突破,成功入选国家工业和信息化部、科技部和环境保护部联合发布的《国家鼓励发展的重大环保技术装备目录(2014年版)》中推广类“资源综合利用”项目,适用废塑料综合利用范围。

(吴红富)

浙江丰利热线:0575-83105888 83100888 83185888

网 址:http://www.zjfengli.com/