

文章编号:1000-582X(2012)03-121-06

高压喷雾射流雾化及水雾捕尘机理的拓展理论分析

周 刚^{a, b}, 程卫民^{a, b}, 聂 文^a, 王 刚^a

(山东科技大学 a. 资源与环境工程学院; b. 矿山灾害预防控制教育部重点实验室, 山东 青岛 266590)

摘 要:通过对射流扰动控制方程、射流色散方程解算结果的分析,基于两相流的喷雾概念模型,引入了空穴、湍流和空气动力共同作用的雾化模型。认为高压喷雾时,喷嘴内部形成的空穴和湍流作用主导喷嘴出口附近的一次雾化,而空气动力则控制着此后的二次雾化过程。提出以临界韦伯数作为射流是否发生二次雾化的判据。根据对液滴破碎方式的分析,认为液流完全分裂成雾滴的射流临界初速度为 60 m/s,且射流破碎一般发生在一次雾化中,薄膜破碎一般发生在二次雾化中。基于液滴对尘粒的主动碰撞理论,对典型喷雾降尘机理进行了改进,认为当含尘气体处于非饱和状态且温度高于液体温度时,捕集率与液滴粒径间存在一个最佳组合;在相同的液气比,相同的液滴喷入时,降低气流速度有利于微细液滴对细小尘粒的捕集。

关键词:射流扰动控制方程;两相流喷雾概念模型;临界韦伯数;射流临界初速度;主动碰撞理论

中图分类号:TD714.4

文献标志码:A

Extended theoretical analysis of jet and atomization under high-pressure spraying and collecting dust mechanism of droplet

ZHOU Gang^{a, b}, CHENG Wei-min^{a, b}, NIE Wen^a, WANG Gang^b

(a. College of Resources and Environmental Engineering; b. Key Laboratory of Mining Disaster Prevention and Control, Ministry of Education, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, P. R. China)

Abstract: The atomization model about interaction of cavitation, turbulence and aerodynamics is put forward through the analysis about the control equation of jet disturbance, the computed result of the dispersive jet equation, according to the conceptual model of spray based on two-phase flow. The action of cavitation and turbulence formed inside nozzle are thought to lead to the first atomization near the nozzle exit, while the aerodynamic effect controls the following second atomization process. And the critical Weber number is taken as the judgment index for occurring of the second atomization or not. The critical velocity for liquid splitting into droplets is 60 m/s according to the analysis of break mode about liquid drop, furthermore, jet fragmentation and film fragmentation occurs in the first and second atomization

收稿日期:2011-10-03

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51074100);山东省自然科学基金资助项目(ZR2010EM016, ZR2011EEQ009);高等学校博士学科点专项科研基金(博导类)资助项目(20113718110005);山东科技大学科研创新团队支持计划资助项目(2010KYTD106)

作者简介:周刚(1979-),男,山东科技大学讲师,博士,主要从事矿山灾害预测与防治和安全管理、安全评价等方面的教学与科研工作,(E-mail)ahsdzhang@163.com.

respectively. The typical mechanism of dust capture by water-cloud is improved through the active collision theory of droplet to dust particle. It is considered that an optimal relationship exists between collection rate and droplet size when gas containing dust is unsaturated and its temperature is higher than that of liquid, moreover, low fluid velocity can be propitious to the collection of tenuous droplet to exiguous dust on the basis of the same liquid-gas ratio and the same quantity of droplets.

Key words: control equation of jet disturbance; conceptual model of spray based on two-phase flow; critical Weber number; critical initial jet speed; active collision theory

由于影响液束特性的参数众多,主要有:喷嘴出口处的流动状态、喷嘴内部的空穴效应、射流速度和湍流以及液体和气体两者物理和热力学的状态等。因此,长期以来,人们对射流雾化机理的认识还不够深入,对喷雾射流雾化现象的理解只是停留在简单的喷嘴内部单相流、喷嘴外部旋动圆锥膜流动等方面^[1-2]。但事实上喷雾射流雾化是建立在流场结构分析及动力学方程基础上的二相流的形状和变形以及界面稳定的问题^[3-5]。有关射流雾化的 KH (Kelvin-Helmholtz Instability Model) 模型、TAB (Taylor's Analogy Breakup Model) 模型、R-T (Reyleigh-Taylor) 波模型等亦没有对该问题进行较为合理的解释。此外,典型喷雾降尘机理认为惯性碰撞与直接截留是液滴捕获尘粒的主要原因,但该理论对惯性碰撞准则数 S_k 的界定存在不严密的问题^[6-7]。

为此,笔者通过对射流扰动控制方程的理论研究,将两相流喷雾概念模型引入射流雾化机理的分析中,并以临界韦伯数和射流临界初速度作为射流是否发生二次雾化的判据。同时基于主动碰撞理论对水雾捕尘机理进行改进,从而得到指导现场喷雾降尘工作的建设性结论。

1 液体射流分裂数学模型

1.1 射流扰动控制方程

在柱坐标系下,射流方向与 z 轴相反,气液流体均为不可压缩流体,喷嘴半径为 a ,射流初速度为 U ,喷入静止气体中,气液两相的运动粘度分别为 ν_2 、 ν_1 ,气液界面处的表面张力为 σ ,射流基本初始状态: (\bar{p}_j, \bar{U}_j) ,其中 $\bar{U}_1 = (0, 0, -U)$, $\bar{U}_2 = (0, 0, 0)$, $\bar{p}_1 = \bar{p}_2 = \frac{\sigma}{a}$,下标 $j=1, 2$ 分别指液相和气相物理量。线性化及无量纲化的射流扰动控制方程为^[8]

$$\frac{\partial \mathbf{V}_j}{\partial t} + (\mathbf{U}_j \cdot \nabla) \mathbf{V}_j = -\frac{\rho_1}{\rho_j} \nabla p_j + \frac{1}{Re_j} \nabla^2 \mathbf{V}_j, \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{V}_j = 0, \quad (2)$$

式中:下标 $j=1, 2$ 分别指液相和气相物理量; \mathbf{U} 、 \mathbf{V}

为射流初速度, m/s ; ρ 为密度, kg/m^3 ; p 为压力, Pa ; Re 为雷诺数。

无量纲化后,可得 5 个无量纲数:气、液两相各自的雷诺数 Re , 韦伯数 We 及气液密度比 Q 。

它们的定义如下: $Re_1 = \frac{Ua}{\nu_1}$ 、 $Re_2 = \frac{Ua}{\nu_2}$ 、 $We_1 = \frac{\rho_1 U^2 a}{\sigma}$ 、 $We_2 = We_1 \cdot Q = \frac{\rho_2 U^2 a}{\sigma}$ 、 $Q = \frac{\rho_2}{\rho_1}$ 。

1.2 射流色散方程

将 (\mathbf{V}_j, p_j) 代入相关的边界条件式得到一含有关于 7 个未知数的 7 阶线性代数方程组^[9]。由于这 7 个数不全为零,从而该线性代数方程组的系数行列式必为零,由此条件得到描述射流自由表面扰动发展的基本方程,称为扰动发展特征方程,亦称色散方程。因其结构非常复杂,可用 $C(k, \omega, Re_1, Re_2, We_2, Q, m) = 0$ 表示。其中, k 、 ω 、 m 为常数。

2 射流雾化机理的完善

2.1 射流扰动控制方程解的分析

设 (p_j, \mathbf{V}_j) 具有简正模态法的形式,解方程(1)、(2)可得液相和气相有关 p 、 \mathbf{V} 的数学解析式。由于 (p_j, \mathbf{V}_j) 相关公式十分复杂,笔者仅给出有关主要结论^[10-11]:

1) 雷诺数 Re 在射流的雾化过程中,起着不稳定性的作用,它加强了射流雾化过程的实现。2) 韦伯数 We 的增大,极大地促进了轴对称和非轴对称扰动的增长。3) 空心柱内部及外部气液密度比在整个射流雾化的过程中具有不稳定性的作用。4) 空心柱内部气流旋转强度 E_a 在雾化过程中加强了自由面上的轴对称扰动和非轴对称扰动,此外,它对自由表面上角向模数为 m 的扰动种类有影响,总的来说随 E_a 的增大,角向模数 m 减少。5) 空心柱外部气流旋转强度 E_b 削弱了自由表面上的轴对称扰动强度,却加强了自由表面的非轴对称扰动。此外, E_b 的增加,能大大增加扰动种类。对于空心柱形液体的高速射流,通过加强外部气流的旋转强度可以更好地达到雾化的目的。6) 喷嘴内半径与液膜厚度比在射

流的雾化过程中起不稳定性的作用。

通过对射流扰动控制方程解的分析,可以看出,喷雾射流雾化现象并非简单的喷嘴内部单相流、喷嘴外部旋动圆锥膜流动问题。而是建立在流场结构分析及动力学方程基础上的二相流的形状和变形以及界面稳定的问题。

2.2 射流色散方程的解算分析

由色散方程可以看出,扰动发展与4个无量纲参数 Re_1 、 Re_2 、 We_2 、 Q 紧密相关。为定量研究这种关系进而探索射流分裂与雾化机理,就必须对特征方程进行数值求解。采用的计算程序是在易世君等人分析实心圆柱形液体射流的程序基础上修改而成的。同时引入一个表征分裂和雾化形态的无量纲数 $Je = We/Q$ 。通过解算,可得到如下结论^[10, 12]:

1)当 $Je < 1$ 时,对应的是分裂形态;当 $Je > 1$ 时对应的是雾化形态。射流分裂过程和雾化过程的机理有所不同。

2)液体雷诺数 Re_1 和气体雷诺数 Re_2 在射流分裂与雾化过程中的作用是不同的, Re_1 在整个射流过程中始终起着不稳定性的作用,它加速了射流的分裂与雾化过程的实现, Re_2 的作用却相反;在射流分裂过程中液体和气体雷诺数的变化对过程的影响不大,但对于射流雾化过程,尤其是非轴对称雾化过程来说,它们的变化对其扰动增长率的影响是非常大的。

3)当 $Je < 1$ 时, We_2 对射流分裂过程具有稳定性的作用;当 $Je > 1$ 时, We_2 对射流雾化过程起着不稳定性的作用,它加速了雾化过程的进行,它的变化对雾化过程中的轴对称扰动和非扰动增长率的影响都是显著的。

4)气液密度比 Q ,即气动力在整个射流分裂与雾化过程中始终起着不稳定性的作用。

5)由雷诺数 Re 、韦伯数 We 及气液密度比 Q 的

定义进一步得出结论:射流分裂过程主要是由气动力和表面张力引起的,气液粘性的变化对过程的进行影响不大;射流雾化过程是气动力、表面张力及气液粘性力共同作用的结果,其中表面张力和液体粘性力对雾化过程起着稳定性的作用,它们阻碍了雾化过程的实现,气动力和气体粘性力在雾化过程中起不稳定性的作用,它们加速雾化过程的进行。

根据上述对射流色散方程的解算分析,笔者认为应该将射流雾化过程分为一次与二次雾化2个过程。此两过程在形式和机理上有较大差异的过程。喷嘴内部形成的空穴和湍流作用主导喷嘴出口附近的一次雾化,而空气动力则控制着此后的二次雾化过程,即射流雾化是空穴、湍流和空气动力共同作用的结果。

2.3 基于两相流喷雾概念模型的建立

由于喷雾用水与喷射环境介质密度比较低,所以空气动力雾化机理应该起主导作用。同时,高压喷雾时将引起喷嘴内部流动的强湍流和空穴现象,这两个因素对喷雾近嘴段的影响也是不可忽视的。

根据 Fath 和 Baumgarten 实验分析结论^[13-14],可以建立一个新的基于两相流的喷雾概念模型及一次雾化的两区模型,分别如图1、2所示。

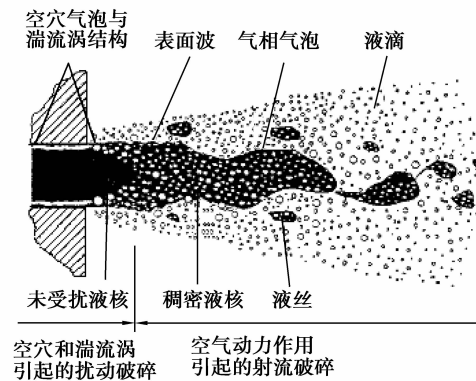


图1 基于两相流的喷雾概念模型

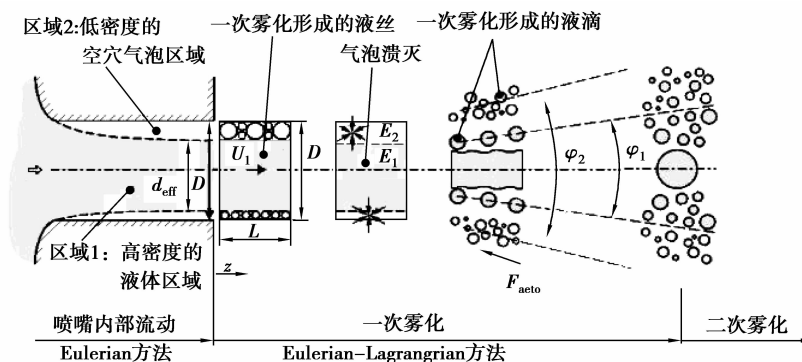


图2 空穴诱导一次雾化模型的两区结构示意图

模型以喷嘴喷孔内发生完全空穴流动的假设为基础,喷嘴内流出的空穴气泡将在自由射流的喷雾区域内生存一段时间,生存时间长度取决于喷嘴结构导致的空穴区分布以及上下游的压力条件,一般在 $1\sim 50\ \mu\text{s}$ 范围内^[15-16]。在这段时间之后,空穴气泡溃灭在射流液体表面产生强烈的扰动,并形成部分破碎液滴。

2.4 射流二次雾化

上述的基于两相流的喷雾概念模型表明,在高压喷雾时,空穴、湍流和空气动力的共同作用是射流雾化的原因。空穴的发展是一次雾化的主要诱因,空穴溃灭时不仅产生强的表面扰动造成液体雾化,而且也卷吸了一部分空气进入液核促进液气混合。湍动能和由空穴溃灭带来的能量是近嘴区域一次雾化的主要动因,这两部分能量提供了一次雾化后增加的表面能和液滴作径向扩散运动的动能^[17]。

一次雾化后形成的液滴进入到气液混合区,此时的液滴速度近似等于喷射速度,与气体间存在较高的相对速度,而受到空气动力的作用,液滴在表面非均匀分布的压力扰动下发生变形,当这个作用力大到足以克服液滴表面张力的恢复力时,变形液滴就会破碎,分裂成更小的液滴,这就是二次雾化现象。

当 $We = d_0 \rho_g v_0^2 / \sigma$ (d_0 为液滴直径, v_0 为液流出口喷射速度, σ 是液滴的表面张力) 超过临界韦伯数 $[We]$ 时发生二级雾化的破碎现象,否则不破碎。

$$[We] = 12(1 + 1.077Oh^{1.5}), \quad (3)$$

$$Oh = We^{\frac{1}{2}} / Re_1 = \mu_l (\sigma \rho_l d_0)^{-\frac{1}{2}}. \quad (4)$$

一次雾化只发生在气液交界面上,主要由气液交界面不稳定波增长和最终演变成液滴破碎引起。二次雾化发生在液气掺混区,由一次雾化后形成的液滴在气体中进一步破碎和相互聚合来决定。

3 液滴的破碎方式

Ohnesorge 综合考虑液体惯性、表面张力、粘性力和空气动力对射流作用的影响,将液滴的破碎分为 4 种状态,分别为:瑞利破碎区、第 1 风生区、第 2 风生区、雾化区,其中在第 1 风生区和雾化区内所生成的液滴直径均远小于喷嘴出口直径。

对液体加压时,从喷嘴喷出液体的状态与其喷出的速度有关。许多研究者在进行了大量的实验研究后,得到表征射流稳定性的 $L-v$ 图^[18-19]。如图 3 所示。

图中纵坐标 L 为雾化长度,表示射流未破碎保持连续部分的长度,横坐标 v 为射流喷射初速度。

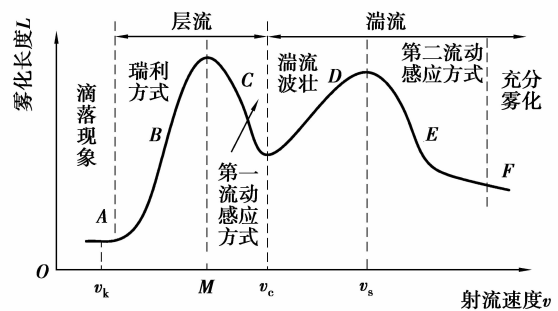


图 3 雾化长度-射流速度关系示意图

其中, A 表示滴落, $d \approx 2d_0$; B 表示平滑流, $d \approx 2d_0$; C 表示过渡流, $d \approx d_0$; D 表示波状流, $d \ll d_0$; E 表示带状雾化流, $d \ll d_0$; F 表示锥状雾化流, $d \ll d_0$ 。 d_0 为喷嘴孔径, d 为液滴直径。

由此可以看出随着喷射速度的增大,射流破碎方式的转变过程:经过滴落、平滑流、波状流而向雾化流过渡的过程中,液柱长度依据液流的喷出速度而变化,雾化首先由 A 的滴落现象开始;当流速超过液流的临界速度 v_k 时,便产生液柱,成为透明的平滑流 B,随着液流速度的增加,液柱也在增长;流速进一步增加,在液柱的前端产生纵向振动,成为 C 那样的、不稳定的过渡流;因为液柱长度变得非常小,所以即使液柱长度再增加,平滑流也已经不再存在,而成为螺旋形不透明的波状流 D;流速增加到 v_s 时,液柱长度达到最大,即使流速超过 v_s ,液柱长度也不再增加,反而减少,最终在管端产生带状雾化流 E 和锥状雾化流 F。对于水来说,临界点 v_c 处的雷诺数 $Re = 1\ 800 \sim 2\ 400$,恰好与层流向湍流的转变点一致。

随着射流初速度的继续增加到 $60\ \text{m/s}$ 以上时,分裂长度增大到最大值。此后,随速度的继续增大,分裂长度开始缩短,直至最终在喷嘴出口处射流即已完全分裂。这仅是指喷嘴内部未受任何旋芯扰动的情况,如果在喷嘴内部加上旋芯使射流未喷出喷嘴时即已受到剧烈的扰动,则液流可能将一喷嘴出口即完全分裂成雾滴。

在液体破碎的过程中,破碎的方式与形成的液滴群的平均尺寸及尺寸分布有密切的关系,射流破碎和薄膜破碎是 2 种最基本的破碎类型。射流破碎一般发生在一次雾化中,薄膜破碎一般发生在二次雾化中,或者发生在气液两相式雾化器中。

可见,为了在喷雾降尘时雾滴能对尘粒达到较高的捕获能力,液滴的射流初速度就必须达到第二流动感应方式或充分雾化的破碎方式,并以薄膜破

碎的形式产生在二次雾化的湍流区。而临界韦伯数 $[We]$ 及射流初速度 v 则可作为雾流是否充分雾化的判断依据。

4 对典型喷雾降尘机理的理论改进

典型喷雾降尘机理认为,湿式除尘的主要原理是惯性碰撞与截获,并以一个惯性碰撞准则数 S_{ik} 来表示这种惯性碰撞能力。但在该 S_{ik} 数的推导过程中,有一个将尘粒相对于气流的速度 v 以尘粒在整个运动过程中的平均速度 v_p 来代替的假设。如果取消此假设,则其结果中会出现 $\ln 0$ 。这说明该 S_{ik} 数的推导是欠严谨的。事实上,对于这些随气流一起运动的尘粒来说,其受力是相当复杂的。它除了受到方向不变的自身重力和浮力外,还受到方向不定的紊流气流的阻力,旋转时产生的压差力和带电时产生的静电力等力的作用^[20-21]。故该 S_{ik} 数推导时对尘粒的运动状态描述是不准确的。

为此,本文通过分析喷入气流中的液滴的运动状态,来对典型喷雾降尘机理进行理论上的改进。

设 x 方向气流速度为 v_0 ,m/s;气体密度为 ρ_0 ,kg/m³;温度为 t ,℃;其相应的动力黏度为 μ ,Pa·s;液滴设为球形,其直径为 d ,m;密度为 ρ ,kg/m³;质量为 m ,kg;喷入气流时在 x 方向的初速度为 u_0 ,m/s; τ 秒后速度为 u_x ,m/s;在 y 方向的初速度为0, τ 秒后速度为 u_y ,m/s。

则液滴在 x (水平)方向的受力为

$$F_x = C_d \frac{\pi}{4} d^2 \frac{\rho_0 (v_0 - u_x)^2}{2}, \quad (5)$$

式中: C_d 为无因次阻力系数,随 $(v_0 - u_x)$ 而变化,为

$$\text{简化计算,在此取为常数; } a_x = \frac{du_x}{dt} = \frac{F_x}{m} = A(v_0 - u_x)^2, A = \frac{3C_d \rho_0}{4d\rho}; \frac{du_x}{(v_0 - u_x)^2} = A dt, \int_{u_0}^{u_x} \frac{du_x}{(v_0 - u_x)^2} = \int_0^\tau A dt, u_x = v_0 - \frac{1}{A\tau + \frac{1}{v_0 - u_0}}.$$

则液滴在 y (垂直)方向的受力为

$$F_y = \frac{\pi}{6} d^3 (\rho - \rho_0) g - C_R \frac{\pi}{4} d^2 \frac{u_y^2}{2} \rho_0, \quad (6)$$

式中: C_R 为 y 方向的气体阻力系数, $C_R = \frac{24\mu}{u_y d \rho_0}$;

$$a_y = \frac{du_y}{dt} = \frac{F_y}{m} = Bg - Cu_y, B = \frac{\rho - \rho_0}{\rho}, C = \frac{18\mu}{\rho d^2};$$

$$\frac{du_y}{Bg - Cu_y} = dt, \int_0^{u_y} \frac{du_y}{Bg - Cu_y} = \int_0^\tau dt, u_y = \frac{1}{C} [Bg - e^{\ln(Bg) - C\tau}].$$

而液滴从喷入点下落的距离为

$$H = \int_0^\tau u_y d\tau = \frac{Bg\tau}{C} + \frac{e^{\ln(Bg) - C\tau}}{C^2} - \frac{Bg}{C^2}. \quad (7)$$

在一个有限长度、有限高度的喷雾捕尘区域内,如果不计传热的影响,则根据 u_x 、 u_y 、 H 与粒径的关系,可以清楚地看到液滴被喷入气流后的运动状况。粒径较大者($>500 \mu\text{m}$),一喷入气流即迅速向下落,其水平速度明显小于气流速度。粒径在 $100 \sim 500 \mu\text{m}$ 的液滴,在离开区域时其水平速度已接近气流速度,在垂直方向已明显下降一段距离。粒径 $<100 \mu\text{m}$ 的液滴则一被喷入即很快接近气流速度,在离开区域时其运动状况已几乎等同于气流中尘粒的运动状况。

可见,喷入气流的液滴其捕集尘粒主要靠喷入时对尘粒的主动碰撞,而不是停留在气流中,等待气流中的尘粒在气流绕过它时才发生惯性碰撞;对于那些微细的液滴来说,其在与气流分离前,与尘粒间还有因紊流、扩散、静电力等相互作用而产生的碰撞。

所以在相同液气比下,液滴粒径小,液滴量就大,捕集尘粒的能力就强,捕集率就高。但捕集率并不完全等同于除尘效率。因为除尘效率是捕集了尘粒的液粒与气流分离的效率。如果液滴太小,首先可能不能与气流分离,这自然导致除尘效率下降;其次,当含尘气体处于非饱和状态尤其是高温的非饱和状态时,已捕集了尘粒的微细液滴还有“还原”为尘粒的可能,而这直接降低了捕集率;因此,当含尘气体处于非饱和状态且温度高于液体温度时,捕集率与液滴粒径间存在一个最佳组合。但当含尘气体处于饱和状态或温度低于液体温度时,小粒径液滴有利于尘粒捕集率的提高。在相同的液气比,相同的液滴喷入时,降低气流速度有利于微细液滴对细小尘粒的捕集。

5 结论

1)射流扰动控制方程是描述液体射流分裂的基本数学模型,将其代入相关的边界条件式,可得到描述射流自由表面扰动发展的色散方程。通过色散方程的解算结果可知表面张力和液体粘性力对射流雾化过程起着稳定性的作用,而气动力和气体粘性力在雾化过程中起不稳定性的作用。

2)在高压喷雾时,空穴、湍流和空气动力的共同作用是射流雾化的原因。空穴的发展是一次雾化的主要诱因,而空气动力则是二次雾化的主导因素。可用临界韦伯数 $[We] = 12(1 + 1.077Oh^{1.5})$ 作为射流是否发生二次雾化的判据。

3)液滴的破碎状态分为瑞利破碎区、第一风生

区、第二风生区、雾化区等 4 种,随着喷射速度的增大,射流破碎方式的转变过程为:经过滴落、平滑流、波状流而向雾化流过渡。其间液柱长度随液流喷出速度的增大呈双周期的增大、减小趋势,直至最终在喷嘴出口处射流即已完全分裂。并认为 60 m/s 为液流完全分裂成雾滴的射流临界初速度。

4) 基于液滴对尘粒的主动碰撞理论,对典型水雾捕尘机理进行了改进。改进后的喷雾降尘机理认为当含尘气体处于非饱和状态且温度高于液体温度时,捕集率与液滴粒径间存在一个最佳组合;在相同的液气比,相同的液滴喷入时,降低气流速度有利于微细液滴对细小尘粒的捕集。

参考文献:

- [1] 刘金武. HSDI 柴油机雾化与排放特性瞬态多维建模和数值研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2007.
- [2] COUSIN J, NUGLISCH H J. Modeling of internal flow in high pressure swirl injectors [J]. SAE Transactions on Technical Paper, 2001, 110 (3): 806-814.
- [3] LIU A B, REITZ R D. Mechanism of air-assisted liquid atomization[J]. Atomization and Sprays Technology, 1993, 3(1): 55-75.
- [4] EROGLU H, CHIGIER N. Initial drop size and velocity distributions for airblast coaxial atomizers[J]. Journal of Fluid Engineering, 1991, 113(3): 453-459.
- [5] MUNDO C, SOMMERFELD M, TROPEA C. On the modeling of liquid sprays impinging on surfaces [J]. Atomization and Sprays Technology, 1998, 8 (6): 625-652.
- [6] 郭金基, 张康治, 王国基, 等. 旋转液体射流雾化的计算理论与实验研究[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 1994, 33(4): 1-6.
GUO JIN-JI, ZHANG KANG-ZHI, WANG GUO-JI, et al. The calculating theory and experimental studies of the atomization with swirl-liquid jet [J]. ACTA Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 1994, 33(4): 1-6.
- [7] LEE C S, PARK S W. An experimental and numerical study on fuel atomization characteristics of high-pressure diesel injection sprays [J]. Fuel, 2002, 81(18): 2417-2423.
- [8] 史绍熙, 杜青, 秦建荣, 等. 液体燃料射流破碎机理研究中的时间模式与空间模式[J]. 内燃机学报, 1999, 17(3): 205-210.
SHI SHAO-XI, DU QING, QIN JIAN-RONG, et al. Temporal mode and spatial mode in the study of liquid jet breakup[J]. Transactions of CSICE, 1999, 17(3): 205-210.
- [9] HALIL G K. Investigations of internal nozzle multiphase flow and its effects on diesel sprays [D]. Madison: The University of Wisconsin-Madison, 1999.
- [10] 周刚. 综放工作面喷雾降尘理论及工艺技术研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2009.
- [11] 严春吉, 解茂昭. 液体射流分裂与雾化机理在喷雾特性预测中的应用[J]. 应用基础与工程科学学报, 2007, 15(4): 552-557.
YAN CHUN-JI, XIE MAO-ZHAO. Application of the mechanism of breakup and atomization of a liquid jet to predicting characteristic parameters of fuel sprays [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2007, 15(4): 552-557.
- [12] YI S J, XIE M Z, CHEN B X. The breakup and atomization of a viscous liquid jet[J]. Acta Mechanica Sinica: English Series, 1996, 12(2): 122-134.
- [13] 侯凌云, 侯晓春. 喷嘴技术手册 [M]. 2 版. 北京: 中国石化出版社, 2007.
- [14] BIANCHI G M, PELLONI P. Modeling atomization of high-pressure diesel sprays[J]. Journal of Engineering for Gas Turbine and Power, 2001, 123(2): 419-427.
- [15] KALAAJI A, LOPEZ B. Breakup length of forced liquid jets [J]. Physics of Fluids, 2003, 15 (9): 2469-2479.
- [16] GAVAISES M, ARCOUMANIS C. Cavitation initiation, its development and link with flow turbulence in diesel injector nozzles [J]. SAE Transactions on Technical Paper, 2002, 111 (3): 561-580.
- [17] 郭金基, 杨宗炼, 邢浩旭. 喷射雾化流体紊流混合降尘的机理研究[J]. 流体机械, 1996, 24(10): 17-19.
GUO JIN-JI, YANG ZONG-LIAN, XING HAO-XU. Research on the dust suppression mechanism of jet atomization fluid and turbulent [J]. Fluid Machinery, 1996, 24(10): 17-19.
- [18] HWANG S S, LIN Z, REITZ R D. Breakup mechanisms and drag coefficients of high speed vaporizing liquid drops [J]. Atomization and Sprays Technology, 1996, 6 (3): 353-376.
- [19] SIRIGNANO W A. Volume averaging for the analysis of turbulent spray flows [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2005, 31(6): 675-705.
- [20] 蒋仲安. 湿式除尘机理的研究与应用[D]. 北京: 中国矿业大学, 1994.
- [21] 刘社育, 蒋仲安, 金龙哲. 湿式除尘器除尘机理的理论分析[J]. 中国矿业大学学报, 1998, 27(1): 47-50.
LIU SHE-YU, JIANG ZHONG-AN, JIN LONG-ZHE. Theoretical analysis of dedust mechanism of wet scrubbers [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1998, 27(1): 47-50.