

喷雾运动初始条件问题的研究*

刘伟 刘燕 严传俊

(西北工业大学航空动力与热力工程系, 西安, 710072)

摘 要: 根据所完成的流动环境中颗粒在初始区域内速度分布的测量结果, 对颗粒运动初始条件的问题进行了全面的研究, 提出了统计性、随机性和确定性的三种初始条件及其数学处理方法。在此基础上, 应用喷雾两相流的数值方法, 计算了喷雾的运动, 比较了不同初始条件对计算结果的影响, 并将所得计算结果与实验结果做了比较, 两者符合较好。

主题词: 燃油雾化, 边界条件, 数值计算

分类号: V231.23

A STUDY ON SPRAY MOTION INITIAL CONDITION

Liu Wei Liu Yan Yan Chuanjun

(Dept. of Aeroengine North Western Polytechnical Univ., Xi'an, 710072)

Abstract: Based on analysis of experimental results on the droplet velocity and flying angle in initial region of water sprays, aspects of initial condition are studied in details, and three ways of treating initial condition, the statistical, the stochastic and the conventional ones respectively, are presented from the experimental results. The spray motion is then calculated by use of numerical method for the two-phase flow, and the effect of different treating methods to droplet initial condition on computational results is studied. The calculated and the experimental results are compared with each other, and they are in good agreement.

Subject terms: Fuel pulverization, Boundary condition, Numerical calculation

1 引言

运用轨道模型求解颗粒运动(如燃烧室内液滴运动或发动机喷管内颗粒运动)时, 需要给定其运动的初始条件, 即给定颗粒运动初始速度的大小及方向。能否正确地确定初始状态将直接影响液滴的运动状态, 并最终对燃料浓度场的分布产生重大的影响。为此, 作者采用激光全息技术测量了实际喷嘴的喷雾液滴速度分布^[1]。该实验结果不仅可用以验证喷雾计算的

* 本文1994年6月17日收到

轨道模型,还由于测得了初始区内的运动参数,为进行初始条件问题的研究提供了可能。本文拟通过对实验结果的进一步分析,对初始条件问题进行深入的分析,提出颗粒运动初始条件的不同处理方法,并在上述工作基础上对喷雾运动进行计算,把有关的结果与实验结果进行比较。

2 主要实验结果

本文实验研究对象是喷嘴在气流中形成的喷雾场及喷雾两相运动,如图 1 所示。

喷雾实验采用进口的 HTRC-5000 脉冲激光全息系统记录。该系统采样空间为 102mm,分辨率可达 $5\mu\text{m}$,可采用离轴或同轴方式进行测量。本文采用同轴方式记录。

实验结果在改进的 HRS-5 全息再现系统上再现。该系统主要由摄像机、三维拖板、闭路电视、数字式坐标读数仪等组成。通过万向控制器,整个系统的操作十分便利。全息干板的数据处理则采用人工方法进行判读^[2]。由于数据处理工作量很大,仅选取图 1 记录干板上 1、2、3 三个位置处的数据进行处理,其中位置 1 距离喷嘴不到 10mm,可近似做为喷雾的初始区域。

主要的实验工况及编号如表 1 所示。

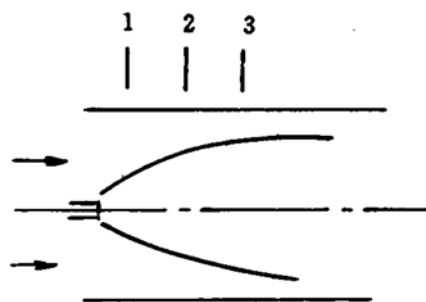


Fig. 1 The spray field of the experiment research

Table 1 The experimental cases

Cases	Nozzles	Fuel pressure (Pa)	Fuel flow rate (kg/h)	Gas flow rate (kg/s)
1	No. 1	39.2×10^4	11.3	0.62
2	No. 1	39.2×10^4	11.3	1.20
3	No. 1	88.3×10^4	18.8	0.62
4	No. 2	39.2×10^4	20.2	0.62

图 2、图 3 给出了喷嘴在喷雾初始区的液滴运动速度及运动角度随液滴尺寸的分布情况。这两个结果为研究液滴初始运动规律提供了基础。可以看到,虽然总的变化趋势表明随尺寸的增大,液滴速度增大,且液滴运动角度也增大,并趋近于喷雾角,但图中也清楚地表明,同一工况下某一尺寸组液滴的速度、角度并不相同,而是具有一定的速度、角度分布范围。对液滴来说,其速度和角度的取值呈现出随机性。显然,要正确地给定液滴初始运动状态,应该考虑到这种分布的随机性。

3 初始条件的处理方法

目前的喷雾计算中,液滴的初始条件通常根据经验或实验测得的出口速度和喷雾角来给定。对所有尺寸组的颗粒都取一个速度,喷雾的扩展则按其喷雾角给定若干方向加以考虑。显然,这种处理方法不够合理。根据对所得实验结果的分析,本文提出以下三种初始条件处理

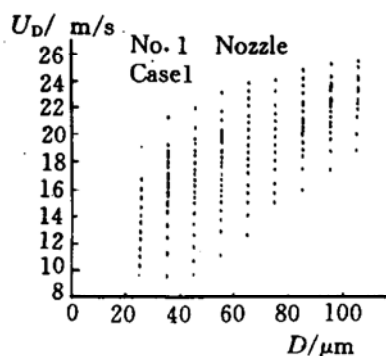


Fig. 2 Droplet velocity distribution

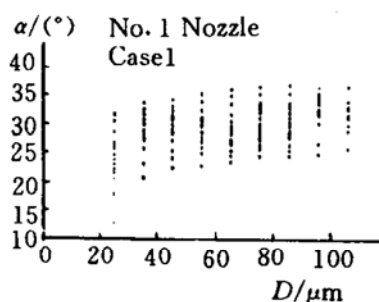


Fig. 3 Droplet flying angle distribution

方法。

3.1 统计性初始条件

实验结果表明, 每一尺寸组的液滴具有不同的速度和角度取值范围, 且取值具有随机性质, 因此可以对每一尺寸组进行统计分析, 从而找到具有统计意义的平均速度和角度值来做为该尺寸组液滴的初始条件。把每一尺寸组中测得的速度、角度实验值做为样本, 求出它们的频数、频率及累积频率, 做出其直方图, 然后判断随机变量的分布类型。实验结果表明, 液滴速度、角度的分布近似地符合 Weibull 分布。由统计数学可知, 对于 Weibull 分布, 其均值由下式求得:

$$\mu = \int_0^{\infty} t f(t) dt = \int_0^{\infty} t F'(t) dt = \eta_0 \Gamma(1 + \frac{1}{m}) \quad (1)$$

其中形状参数 m 和尺度参数 η_0 可以由样本值估算或由概率图估计得到。这样, 采用上述方法, 对不同的尺寸组, 可以得到相应的尺寸与平均速度、平均运动角度的关系。

3.2 随机性初始条件

为了更真实地模拟初始条件分布的随机性, 可以直接采用随机模拟的方法。由于已经求得各个尺寸组速度和角度分布的类型以及分布参数, 因而这种处理方法已成为可能。这种处理方法主要是采用一定的算法编制计算机程序, 进而产生具有 Weibull 分布的随机数。认为颗粒速度和角度各自独立, 因此它们产生各自的随机数, 并以此作为各尺寸组的初始条件。

3.3 确定性初始条件

上述两种处理方法, 比较全面地考虑了喷雾液滴的实际情况, 但模拟计算和数据处理工作量很大。为此还提出了一种确定性的初始条件处理方法, 其运用步骤是:

(1) 根据测量值, 对每一尺寸组的颗粒选定三个速度值和三个运动角;

(2) 设某尺寸组粒子所测得速度和角度的最小、最大值分别为 $U_{\min}$ 、 $U_{\max}$ 和 $\alpha_{\min}$ 、 $\alpha_{\max}$, 则速度和方向取为:

$$U_i = U_i(U_{\min}, U_{\max}, i) \quad i = 1, 2, 3$$

$$\alpha_i = \alpha_i(\alpha_{\min}, \alpha_{\max}, i) \quad i = 1, 2, 3$$

本文取 U_i , α_i 分别在取值范围内线性变化。

为叙述方便, 以后把采用统计性、随机性和确定性三种初始条件的计算分析称为 LS、LR

和 LC 法。

4 喷雾运动的计算

对本文的流动,其气相控制方程可用通用形式出:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u \varphi) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v \varphi) = \frac{\partial}{\partial x}(\Gamma \frac{\partial \varphi}{\partial x}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \Gamma \frac{\partial \varphi}{\partial r}) + S_{\varphi} + S_p \quad (2)$$

式中 x, r 为轴向及径向坐标, ρ 为气体密度, φ 表示求解变量, 分别表示连续方程、动量方程、脉动动能 k 及其耗散率 ε 的输运方程。(2) 式中 S_p 是考虑液相存在而造成的附加颗粒源项。

两相流模型选用广泛使用的分散群模型^[3], 颗粒的运动方程可用下式表示:

$$\frac{d\vec{U}_p}{dt} = \left(\frac{18\mu}{\rho D^2}\right) \left(\frac{C_D Re}{24}\right) (\vec{U} - \vec{U}_p) \quad (3)$$

式中 D 为颗粒直径, Re 为颗粒雷诺数, C_D 为阻力系数, 可由经验公式给出。

方程 (3) 可采用四阶 Runge-Kutta 方法求解, 求得 $\vec{U}_p$ 后, 可按其定义求出颗粒运动的轨迹。由于液滴存在对气相造成的动量源项为:

$$\Delta V \cdot S_{p,u} = \frac{\pi}{6} \rho_p \sum_{k,j} N_k N_j [(U_k d_k^3)_{out} - (U_k d_k^3)_{in}] \quad (4)$$

$$\Delta V \cdot S_{p,v} = \frac{\pi}{6} \rho_p \sum_{k,j} N_k N_j [(V_k d_k^3)_{out} - (V_k d_k^3)_{in}] \quad (5)$$

式中角标 in 和 out 分别表示进入和离开气相单元的值; 角标 k 表示颗粒尺寸组; 角标 j 表示同一尺寸组不同方向的轨道; N_k 为每条轨道上单位时间内通过的 k 组颗粒数; N_j 为轨道数。

本文采用 PSIC 算法求解喷雾两相流场^[3]。气相场差分方程组由 Simplex 方法求解, 由颗粒相的计算求出颗粒速度、轨迹和颗粒群源项, 然后把求出的颗粒源项代入气相方程再反复迭代求解, 直到满足收敛条件为止。

5 计算结果及其与实验结果的比较

图 4~7 分别给出了轴向位置为 40mm 处液滴平均速度和角度计算值及其实验测量值。计算结果反映了液滴尺寸越小, 其运动速度在一定距离后越接近于气流速度以及运动角度随尺寸呈现出小液滴上升快、大液滴上升趋于缓慢的实验规律。图 4~5 中给出了用 LS 和 LR 法的计算结果, 而图 6、7 则给出了 LS、LC 法的计算结果。可以看出, 相对于 LS 法, LR 法的计算结果更接近于实验值, 而 LC 法的计算结果则更偏离相应的实验值。可见, 液滴初始条件的不同处理方法, 对喷雾两相流的计算结果确有一定的影响。要指出的是: 计算值与实验值存在着偏差, 似由阻力系数取值、湍流扩散等原因造成。但由于它们对不同的初始条件的计算有同样的影响, 故对本文中有关初始条件问题的讨论影响不大。

6 结 论

(1) 液滴在初始区的运动速度和运动角度分布具有一定的随机性, 不同尺寸组的液滴具有不同的分布范围, 且近似于 Weibull 分布。这一实验结果表明, 喷雾计算中必须正确处理颗

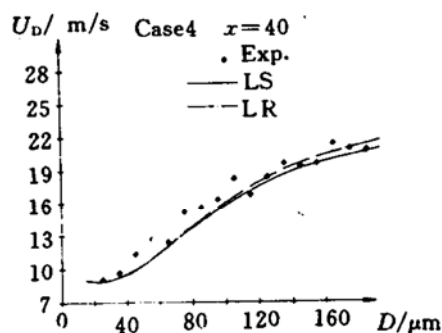


Fig. 4 The comprison of the experiment results with computational results for droplet velocity

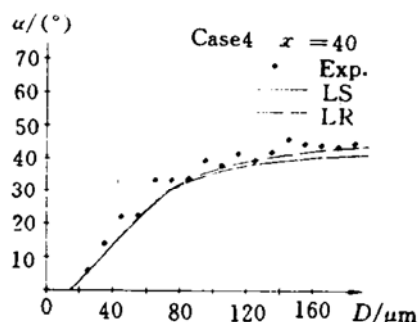


Fig. 5 The comprison of the experiment results with computational results for droplet flying angle

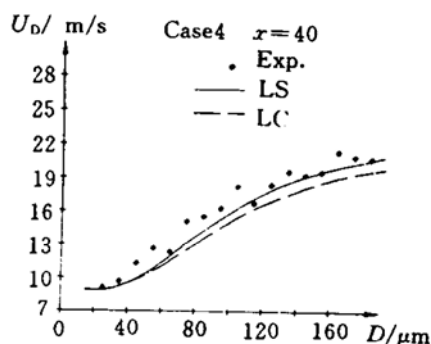


Fig. 6 The comprison of the experiment results with computational results for droplet velocity

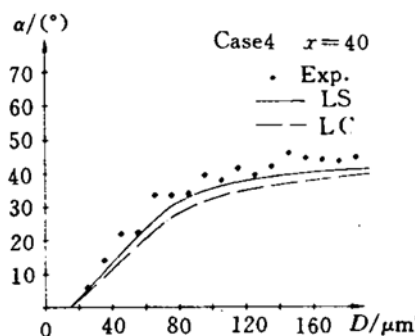


Fig. 7 The comprison of the experiment results with computational results for droplet flying angle

粒的初始运动条件;

(2) 计算结果表明, 初始条件的处理方法对喷雾计算确有较大的影响。统计性、随机性初始条件比较全面地考虑了喷雾液滴的实际情况, 因而得到的计算结果与实验结果比较一致, 而确定性初始条件虽然比较简单, 但所得结果与实验值的偏离增大。总的来说, 计算结果反映了实验变化规律, 表明所采用的处理方法和计算方法是合理的、适用的。

参 考 文 献

- [1] 刘 伟. 喷雾特性的实验研究. 西工大七研实验报告, 1993
- [2] 何万详. 应用激光全息术对柴油机油雾场分析规律的测量研究. 内燃机学报, 1985 (1)
- [3] 周力行. 湍流两相流动与燃烧的数值模拟. 北京: 清华大学出版社, 1991