

# 高反压环境中空气雾化 喷嘴的雾化性能\*

王 兴 甫

(航天工业总公司 31 所, 北京, 100074)

**摘 要:** 使用美国 Purdue 大学“热力科学及推进研究中心”的高反压喷嘴试验设备, 试验研究了空气雾化喷嘴在高反压环境中的雾化性能。试验中对一种典型空气雾化喷嘴, 使用粘度分别为 0.001, 0.050 和 0.100 Pa·s 的三种液体, 在 0.1~1.8MPa 反压范围内, 用 Malvern 粒度分析仪, 测量了喷雾的液滴平均直径及液滴尺寸分布。

试验结果表明, 在试验的环境压力和液体粘度范围内, 提高喷嘴的气液比总是起着改善雾化的作用。随着液体粘性的增高, 其作用明显加强。试验还发现, 对于高粘性的液体, 随着环境压力的提高, 喷雾中的液滴尺寸趋于更加均匀。即液滴尺寸分布参数增大。

在较宽的粘度范围内得到的试验数据发现了以往使用的半经验公式中的错误, 进一步改善了该公式并拓宽了其使用范围。从而加深了对雾化机理的认识。

**主题词:** 燃料喷嘴, 喷雾, 气体雾化, 液滴, 压力效应, 反压力

**分类号:** V231.23

## ATOMIZATION OF AN AIR-BLAST NOZZLE AT HIGH AMBIENT PRESSURES

Wang Xingfu

(The 31st Research Institute, Beijing, 100074)

**Abstract:** An experimental study on atomization of an air-blast nozzle at high ambient pressures was carried out at High Pressure Lab. of Thermal Science and Propulsion Center, Purdue University, U. S. A. The mean drop diameters and the drop size distributions of the sprays for three liquids with viscosities of 0.001, 0.050 and 0.10 Pa·s at ambient pressure of 0.1~1.8MPa were measured with Malvern Particle Size Analyser.

The experimental results show that for all liquids and all ambient pressures,

\* 本文 1993 年 9 月 14 日收到

the mean drop size always diminishes with increase in air/liquid ratio. This effect is enhanced for liquids of higher viscosity. It is also found in this study that the drop size distribution parameter increases with increase in ambient pressure, thus indicating a more uniform drop size in the spray.

This study proves whether the mean drop size goes up or down with increase in air pressure depends on the liquid viscosity. For liquids of low viscosity, such as water, an increase in pressure causes the mean drop size to decrease. For liquids of high viscosity, the mean drop size is increased by an increase in air pressure.

The experimental data obtained in the present investigation demonstrate that the semi-empirical equation for mean drop size is improved by using liquid density in the expression for Reynolds number instead of air density.

**Keywords:** Fuel injector, Spraying, Gas atomization, Drop, Pressure effect, Back pressure

## 1 引 言

由于空气雾化喷嘴具有许多优于压力雾化喷嘴的特点,例如,它能在较低的喷射压力下产生较细的喷雾,因此空气雾化喷嘴目前在工业界及航空领域得到了广泛的应用。

经喷嘴喷出的液束或液膜,在压力和雾化空气的作用下,首先破碎成碎片,然后进一步形成细小的液滴。由于雾化机理的复杂性,实际使用的喷嘴在给定的工作条件下不可能产生直径均匀的液滴。实际喷雾中包含了各种直径的液滴。其直径变化范围很宽,一般说来,从几个微米到几百微米。因此,衡量喷嘴的雾化质量除使用液滴平均直径以外,还需要另一个重要参数,即液滴尺寸分布。

液滴平均直径并不是液雾中液滴的实际尺寸,而是为了衡量喷雾质量人为定义的一个参数。常用的液滴平均直径有索太尔平均直径,它表示整个喷雾中液滴总表面积与液滴总体积之比。迄今为止,由于人们对雾化所包含的物理过程了解得还不够深透,绝大多数对雾化所产生的液滴直径和液滴尺寸分布的研究还是试验性的,缺乏对雾化过程的理论分析。仍然是用经验或半经验公式来描述喷雾中液滴平均直径与气、液体的物理性质、流动状态以及喷嘴几何参数之间的关系。

在以往对空气雾化喷嘴的研究中,通常用如下形式的半经验公式估算喷嘴所产生的液雾液滴平均直径<sup>[1]</sup>:

$$\frac{SMD}{L} = \left[ 1 + \frac{1}{ALR} \right]^x \left[ A \left( \frac{\sigma_L}{\rho_A U_R^2 L} \right)^a + B \left( \frac{\mu_L^2}{\rho_L \sigma_L L} \right)^b \right] \quad (1)$$

式中  $ALR$ ——喷嘴气液质量比

$\rho_L$ ——液体密度

$SMD$ ——索太尔平均直径

$\sigma_L$ ——液体表面张力

$L$ ——喷嘴特征尺寸

$U_R$ ——液体喷射相对速度

$\rho_A$ ——空气密度

$A$ 、 $B$ 、 $a$ 、 $b$  和  $x$ , 对于给定的喷嘴为常数, 由试验确定。通常  $a$  为 0.2~0.5,  $b$  为 0.5,  $x$  为 0.5~1.0。

上述公式所依据的试验数据都是用低粘性的液体，主要是水和煤油，在低反压条件下得到的，因此，没有理由可以相信它能估算用高粘性液体在高反压下工作的空气雾化喷嘴有液滴平均直径。

本研究的目的在于：

- a. 使用不同粘性的三种液体（粘性高至  $0.100 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ），在不同环境压力下（高压  $1.8 \text{ MPa}$ ）测量一典型空气雾化喷嘴的液滴平均直径和液滴尺寸分布。
- b. 得出能在更高的液体粘性和更宽的环境压力下较精确地估计喷嘴液滴平均直径的半经验公式。

## 2 试验设备

图1为该试验所用设备的简图。设备的主要部分是一个压力容器，如图2所示。它由两段直径为  $200 \text{ mm}$  的圆管组成，前段如图3所示，用以支持喷嘴，喷嘴位于圆管的中心沿轴线向后喷射。在此段上还有向喷嘴输送雾化空气和液体的进口。雾化空气分成两部分，主雾化空气位于喷嘴的中心，次雾化空气在喷嘴液膜的外侧。两股雾化空气的流量分配是固定的。此外，还从压力容器的侧面引入一股空气，其作用是将喷嘴喷出的液滴带向下游，防止液体在管道底部积存及液滴回流，影响测量的准确性。该股空气在测量截面上的流速大约为  $1 \text{ m/s}$ 。

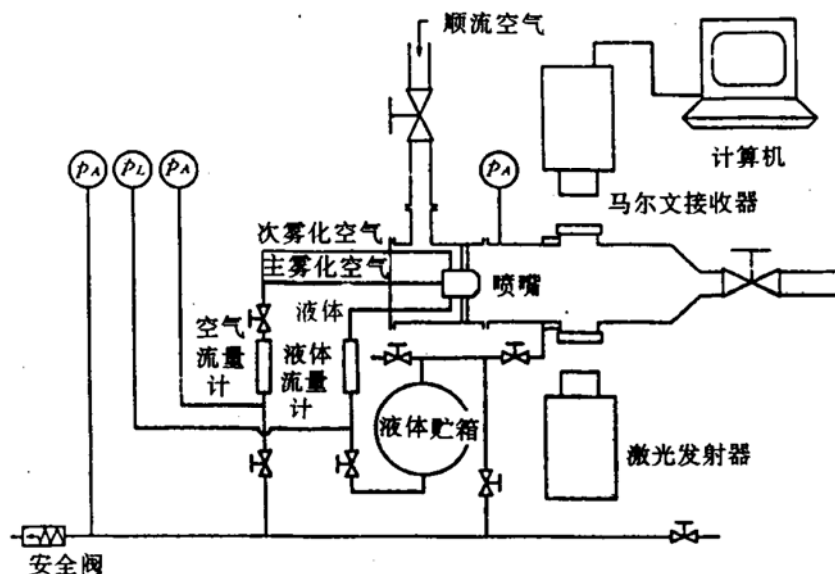


图1 试验设备简图

在压力容器后段的壁面上，径向相对地开有两个测量窗，测量的激光束经窗口石英玻璃，穿过喷雾中心。压力容器末端的阀门用来调节和控制容器内的压力。

除此之外，该设备还具有控制和测量雾化空气和液体流量以及容器压力（喷嘴反压）所必须的流量计和压力表等。

## 3 喷雾特性

与本研究关系最大的喷雾特性是液滴平均直径和液滴尺寸分布。

### 3.1 液滴平均直径

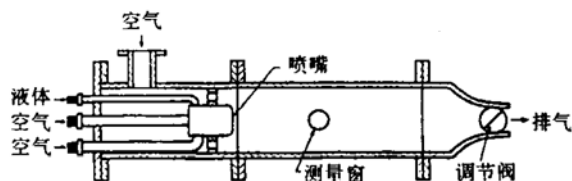


图2 高反压下测量喷雾特性装置简图

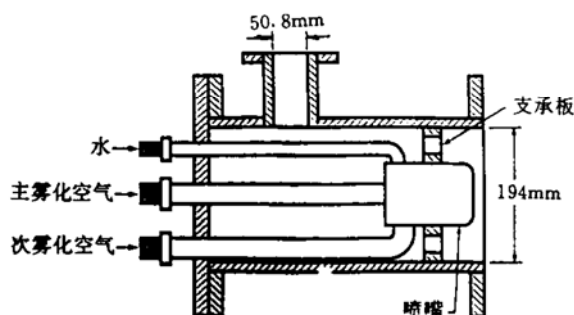


图3 喷嘴安装示意图

为了便于衡量和比较各种喷嘴的雾化质量,在喷雾研究中引入了“液滴平均直径”的概念。在不同的场合,其定义也不一样。通常是用一个假想的喷雾来代替给定的喷雾而保留其基本特点。这个假想喷雾中所有的液滴具有相同的直径,该直径就是“液滴平均直径”的概念。应用最广泛的索太尔(SMD)平均直径定义为,假想喷雾中所有液滴的总体积与总面积之比与原真实喷雾相同,即:

$$SMD = \frac{\sum nD^3}{\sum nD^2} \quad (2)$$

此外,质量平均直径(MMD)也常使用。其定义是在真实喷雾中直径小于或大于该直径的液滴质量之和为整个喷雾质量的50%。

### 3.2 液滴尺寸分布

由于雾化过程的性质不同,射流或液膜破碎成的碎片尺寸变化很大,因而形成的液滴直径也变化很大。只有在某种特定的条件下(如旋杯式喷嘴在一定的流量和旋转速度范围之内)才能得尺寸均匀的液滴。因此,除了液滴平均直径以外,另一个重要的性能参数是液滴尺寸分布。一般说来,喷雾中液滴直径的变化范围为3~300μm。

理论计算液滴尺寸分布是十分困难的,试验测定也不易准确。目前使用最广泛的表达液滴尺寸分布的公式是1933年Rosin和Rammler研究固体粉末时得出的公式<sup>[2]</sup>。它可以写成:

$$1 - V = \exp - (D/x)^q \quad (3)$$

式中 $V$ 是直径小于 $D$ 的液滴体积在喷雾液滴总体积中所占的分数。 $x$ 和 $q$ 是常数。因此,用上述公式表示喷雾时,可以用 $x$ 和 $q$ 两个参数来表达喷雾的液滴尺寸分布。指数 $q$ 表示液滴直径散布的宽度。 $q$ 值越大,喷雾中的液滴直径越均匀。若 $q$ 为无穷大,则喷雾中所有液滴的直径相同。常用喷嘴所产生的喷雾, $q$ 一般在1.8到3之间。

虽然在Rosin-Rammler公式中假设液滴尺寸的变化范围是无限的,但是它的优点在于简单方便,而且能将数据曲线外插到直径很小的液滴范围内,而这个区域正是很难测量且不易准确的。

## 4 测量方法

在本研究中,液滴平均直径(SMD)是用马尔文粒度分析仪测量的。使用仪器中的双参数模式,用 $x$ 和 $q$ 两个参数就可以测量其液滴尺寸分布。

测量中利用Dodge提供的方法对遮光率进行修正<sup>[3]</sup>。

5 试验结果

用水和粘度分别为 0.050 和 0.100Pa·s 的另外两种液体进行了试验, 所获得的液滴平均直径的数据示于图 4、5 和 6 中。粘性液体的液滴尺寸分布示于图 7 和 8 中。图中  $SMD$  和  $q$  随气液质量比的变化曲线是在反压分别为 0.27、0.61、1.12、1.63、1.80MPa 条件下得到的。

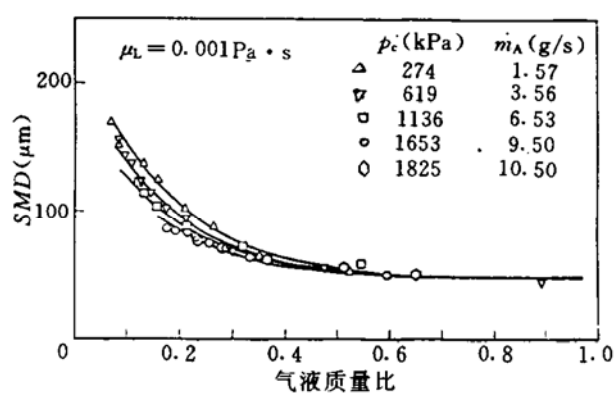


图 4 水在不同反压下的平均液滴直径

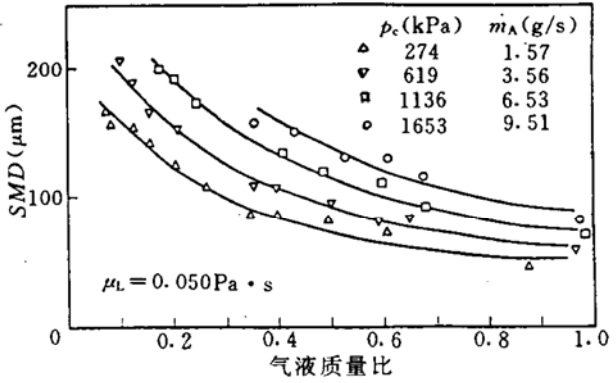


图 5 粘度为 0.050Pa·s 的液体在不同反压下的平均液滴直径

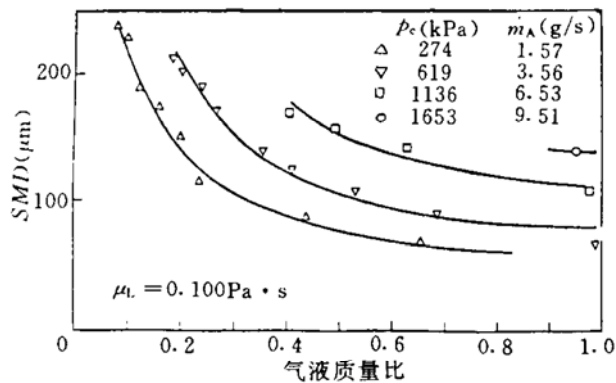


图 6 粘度为 0.10Pa·s 的液体在不同反压下的平均液滴直径

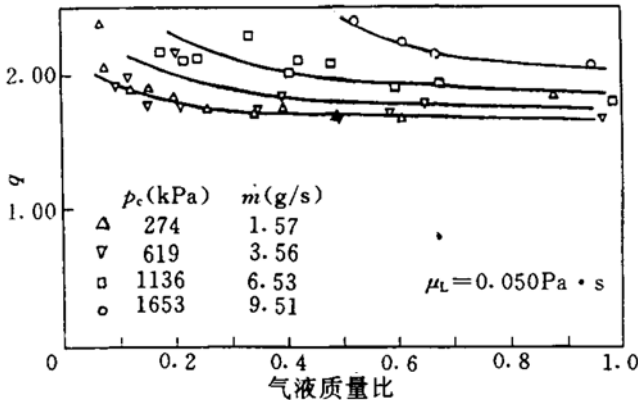


图 7 粘度为 0.05Pa·s 的液体在不同反压下的液滴尺寸分布参数

测量数据是在喷嘴下游 250mm 处, 沿喷雾中心线得到的。由于受遮光率和试验系统工作压力的限制, 在最高反压下和低气液比条件下得到的数据较少。

三种液体所得到的数据表明, 液滴平均直径随气液比的增加而减小。对水来说, 如图 4 所示, 液滴平均直径随反压的增高而减小, 这与以往的研究结果是一致的。对高粘度液体来说, 图 5 和图 6 的结果表明, 其液滴平均直径随反压的增高而增大, 这将在本文后面进一步讨论。

一般说来, 液滴尺寸分布很难靠试验精确测量, 因为数据规律性不好, 散布较大。从图 7 和图 8 仍可以看出  $q$  值随反压增高而增大的趋势。这说明在高反压下喷雾液滴尺寸变得更加均匀。

对照比较上述结果还可以发现, 液体粘性增加总是使液滴平均直径增加。还可以看出, 反压高时粘度对液滴平均直径的影响加强。而随着气液比的增加, 反压对液滴平均直径的影响

减弱;随着液体粘性的增加,反压及气液比对液滴平均直径的影响增强。

## 6 液滴平均直径经验表达式

空气雾化喷嘴的液滴平均直径基本表达式也可表示为:

$$SMD = SMD_1 + SMD_2$$

分析影响  $SMD_1$  和  $SMD_2$  的因素,形成与公式

(1) 一样的表达式

$$\frac{SMD}{L} = \left[1 + \frac{1}{ALR}\right]^x \left[ A \left( \frac{\sigma}{\rho_A U_R^2 L} \right)^a + B \left( \frac{\mu_L^2}{\rho \sigma L} \right)^b \right] \quad (4)$$

式中  $L$ ——喷嘴的特征尺寸

$ALR$ ——气液质量比

$\rho_A$ ——空气密度

$\rho_L$ ——液体密度

$U_R$ ——空气与液体间的相对速度

$\mu_L$ ——液体粘性

$\sigma$ ——表面张力

注意在  $SMD_2$  一项中有关密度的符号没有脚注。这是因为在过去对空气雾化喷嘴的试验研究中从来也没有明确过它到底是空气密度还是液体密度,或者是二者的组合。

研究公式 (4) 可以得出,  $SMD_1$  中的主项是韦伯数  $We$  的倒数,而  $SMD_2$  受  $Z$  函数的控制,即

$$Z = \sqrt{We}/Re$$

式中  $We$  是韦伯数,  $Re$  是雷诺数。故公式 (4) 可改写成

$$SMD/L = SMD_1/L + SMD_2/L = [1 + 1/ALR]^x A (1/We)^a + [1 + 1/ALR]^x B (Z^2)^b$$

韦伯数只能表示为

$$We = \rho_A U_R^2 L / \sigma_L$$

问题出在雷诺数上,在过去的研究中有时定义为  $\rho_A U_R L / \mu_L$ ,而有些情况下则被定义为  $\rho_L U_R L / \mu_L$ ,后者似乎更为合理些。

按第一个定义,则

$$SMD_2 \propto \frac{\mu_L}{(\sigma \rho_A L)^{0.5}}$$

而第二个定义则是

$$SMD_2 \propto \frac{\mu_L \rho_A^{0.5}}{\rho_L (\sigma_L L)^{0.5}}$$

所以,在一种情况下  $SMD_2$  随空气密度的增加(反压增高)而减小;而在另一种情况下

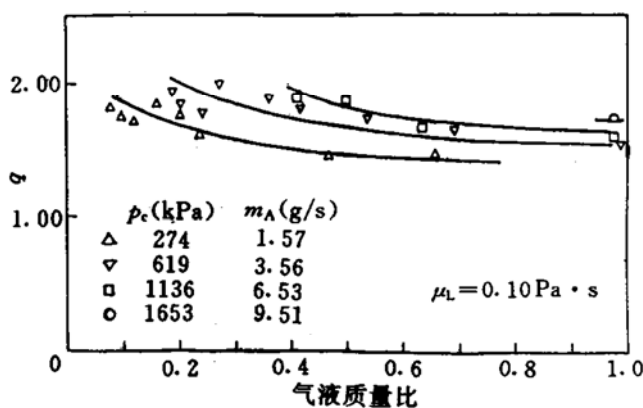


图8 粘度为  $0.10 \text{ Pa} \cdot \text{s}$  的液体在不同反压下的液滴尺寸分布参数

$SMD_2$  随空气密度的增加而增大。

对于低粘性液体, 通常  $SMD_2$  远远小于  $SMD_1$ 。所以  $SMD_2$  随空气密度的增加是增大还是减小并不重要。在这种情况下, 如何定义雷诺数的问题并没有引起研究者的注意。

但是, 在本研究中, 用高粘性液体在高反压条件下得到的数据表明, 式中雷诺数所用的密度应当是液体的密度。因此,  $SMD$  的经验公式应写成:

$$\frac{SMD}{L} = \left[ 1 + \frac{1}{ALR} \right]^x \left[ A \left( \frac{\sigma}{\rho_A U_R^2 L} \right)^a + B \left( \frac{\mu_L^2 \rho_A}{\rho_L^2 \sigma_L L} \right)^b \right] \quad (5)$$

根据研究得到的数据拟合后的具体公式为:

$$\frac{SMD}{L} = \left[ 1 + \frac{1}{ALR} \right]^{0.67} \left[ 0.084 \left( \frac{\sigma}{\rho_A U_R^2 L} \right)^{0.12} + 1.75 \left( \frac{\mu_L^2 \rho_A}{\rho_L^2 \sigma_L L} \right)^{0.5} \right] \quad (6)$$

上述公式使用 SI 单制, 量纲正确。该公式也可以使用其他的单位制。针对本研究中所用喷嘴, 式中特征尺寸  $L$  为喷嘴的液膜初始厚度。

图 9 给出了使用上述公式的计算值与试验测量结果的比较。可以看出两者的一致性是比较满意的。

由于本研究中液体的粘性及反压变化范围较宽, 因此本文所提出的计算液体平均直径公式的适用范围比过去其他研究者给出的类似公式更宽。

## 7. 结 论

根据本研究中用水及其他两种高粘性液体在较宽的反压范围内得到的试验结果, 可以得出如下结论:

- (1) 液滴平均直径总是随着气液比的增加而减小。液体粘性增加, 该影响加强。
  - (2) 随着反压的增高, 液滴尺寸分布参数增大, 这表明喷雾中液滴尺寸更加均匀。
  - (3) 反压对液滴平均直径的影响反映在两个方面。一是通过韦伯数 ( $SMD_1$ ), 反压增加液滴平均直径减小。另一方面是通过  $Z$  参数 ( $SMD_2$ ), 反压增高液滴平均直径增大。
- 喷雾中液滴平均直径随反压增高究竟是增大还是减小, 这取决于液体的粘性。
- (4) 本研究得到的试验数据表明,  $SMD$  半经验表达式中雷诺数应当用液体密度计算, 而不是空气密度, 从而进一步完善了以往的半经验公式。

## 参 考 文 献

- [1] Lefebvre A H. Atomization and Sprays. Hemisphere Publishing Corporation, 1989
- [2] Rosin P, Rammler E. The Laws Governing the Fineness of Powdered Coal. J Inst Fuel, 1933, 7 (31): 29~36
- [3] Dodge L G. Calibration of Malvern Particle Sizer. Applied Optics, 1984, 23: 2415~2419

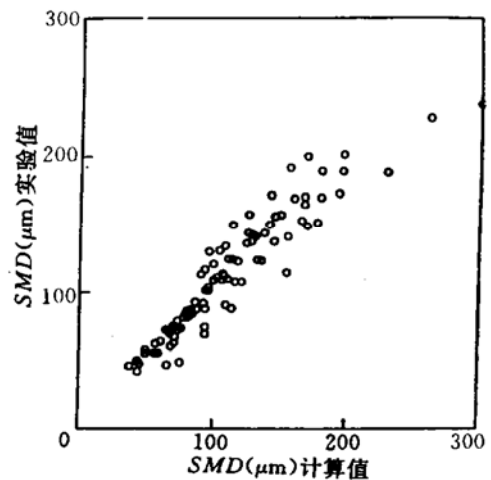


图 9 液滴平均直径经验公式计算值与试验测量值的比较