

甩油盘的雾化分析*

贾永忠

(航天工业总公司31所, 北京, 100074)

摘 要: 利用振动频谱的分析方法, 并依据大量实验, 建立了甩油盘雾化液滴的 *SMD* 和燃油的各物理参数以及轴的转速等几个重要参数之间的关系, 从而对甩油盘的设计和实验方向提供了理论依据。计算结果和经验公式的对照表明, 给出的关系式有很强的指导意义。

主题词: 推进剂雾化, 振动谱, 离心喷嘴, 分析

分类号: V231.23

AN ANALYSIS ON ATOMIZATION OF FUEL SLINGER

Jia Yongzhong

(The 31st Research Inst., Beijing, 100074)

Abstract: Based on the theory of vibration frequency spectrum analysis (TVFSA), the relations between *SMD* of a spray produced in a fuel slinger and fuel properties and turbine rotation speed are discussed in this paper. It is indicated in experiments that the theory is reliable in design of fuel slingers.

Subject terms: Propellant spray, Vibrational spectrum, Centrifugal injector, Analyzing

符 号 表

b ——甩油盘孔的长度 m	SMD ——索太尔直径 m
d ——液滴的平均半径 m	p ——压力 N/m^2
f ——振动频率 $1/s$	R ——甩油盘半径 m
HJ ——无量纲准则数, 定义为	r ——甩油盘孔的半径 m
$\sqrt{HJ} = \sqrt{(T/\rho_L r_0^3 f_0^3)}$	T ——表面张力系数 N/m
R_1 ——甩油盘内壁半径 m	σ ——均方差
R_2 ——甩油盘外壁半径 m	ρ ——燃油密度 kg/m^3

* 本文1994年9月10日收到

Re ——雷诺数

ϵ ——折合半径系数

S ——振动频率概率分布

μ ——燃油黏度 $\text{Pa} \cdot \text{s}$

1 引言

甩油盘雾化方式是折流环形甩油盘式燃烧的雾化方案。由于该雾化方式雾化质量高, 周向分布均匀, 结构紧凑且雾化质量和供油压力无关而被广泛应用在各种小型发动机上。这种发动机供油系统简单, 增加了安全性。甩油盘的广泛应用使人们有必要更加细致地去研究其雾化机理以适应新的设计需要。

作者^[1]曾提出用振动频谱分析的方法, 来分析预测各种雾化方案的雾化质量, 并且成功地得出了淋喷式燃烧器各主要参数与雾化质量的关系。现用该方法来研究甩油盘的雾化状况, 找出各种影响参数与液滴平均直径 (SMD) 的数学关系。

甩油盘的雾化过程中, 当燃油在强大的离心力作用下高速从小孔中喷出后, 立刻形成一个倒圆锥液膜。由于液体初始的湍流状态及和空气的相互作用, 而产生了大量的噪声振动。这些振动以其特有的波长附着在液膜上传播发展, 从而形成一个频谱丰富的不稳定波系。随着这些不稳定表面波的发展, 液膜被撕成许多环状丝。继而又被横向发展的表面波撕成细小的液体, 其物理模型见图 1。Goren 的实验表明, 对于这些表面波存在一个临界波长 λ_0 , 当 $\lambda < \lambda_0$ 时该表面波是稳定的, 说明该波长的振幅随着波在液膜上的发展是衰减的, 就是说并非所有的噪声波都对雾化有贡献。另外为了简化计算, 我们假设上面提到的那些随机噪声振动是白噪声, 就是说各频率的噪声强度都是相等的。另外我们还要假定对甩油盘雾化而言, 液膜上传播的主要振动波来源于甩油盘的周期转动。

2 理论

假设:

(1) 液膜上表面波系的主要中心频率与甩油盘的转动周期一致。

(2) 液体和气体的湍动及其相互作用而产生的一切噪声振动的综合结果是白噪声。

(3) 液膜上传播的表面波并非都不稳定。波存在一个临界波长 λ_0 , 当 $\lambda < \lambda_0$ 时该波是稳定的。

(4) 半径的折合系数仅是雷诺数的函数。

方程与推导:

假设 (1)、(2) 可以导致这样一个结论: 液膜上的表面波系的频谱呈高斯分布, 即:

$$S = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(f-f_0)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (1)$$

其中

$$f_0 = 2\pi\omega \quad (2)$$

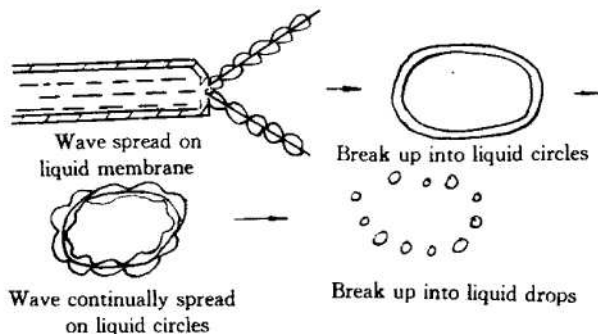


Fig 1 Liquid breaking up physical model of oil slinger

ω 为甩油盘的角速度, 于是 (1) 变成

$$S = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(f - 2\pi\omega)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (3)$$

对于同样形式的谱分布, 应用假设 (3), 文献 [1] 给出了层流状态下小孔出流的一级雾化的描述

$$\overline{d^*} = \left[\frac{3}{4} \epsilon^{\frac{3}{2}} X \frac{\int_0^{\frac{\lambda^*}{2\pi} \frac{X}{\epsilon^{\frac{3}{2}}}} \exp\left[-\frac{(f^* - 1)^2}{2\sigma^2}\right] df^*}{\int_0^{\frac{\lambda^*}{2\pi} \frac{X}{\epsilon^{\frac{3}{2}}}} \exp\left[-\frac{(f^* - 1)^2}{2\sigma^2}\right] df^*} \right]^{1/3} \quad (4)$$

其中 ϵ 为液体的收缩率, X 是一个无量纲数被定义为

$$X = \sqrt{HJ} = \sqrt{\frac{T}{\rho_L r_0^3 f_0^2}}$$

对于湍动的小孔通流的雾化而言, (4) 式中收缩率 ϵ 已失去了原有的物理意义。不过从文献 [2] 的实验来看, 无论湍流还是层流情况我们都可定义一个出口半径雾化折合系数 ϵ ——有着和收缩率 ϵ 相似的意义。也是说从计算上可以这样看: 即使是湍流状态我们可以想象液体从孔中流出后, 仍然存在这样一个液柱, 其半径为 $r_0 \epsilon$ (注意实际情况并非如此。这样仅是从计算角度上考虑, 但不会影响计算结果)。有的实验指出: 折合系数 ϵ 是出流速度的函数。不过根据我们定义的 ϵ 的物理含意来看, 我们认为 ϵ 应该是雷诺数的函数, 即假设 (4)。写成表达式

$$\epsilon = f(Re) \quad (5)$$

代入 (4) 式应有

$$d^* = f(Re, X, \lambda^*, \sigma) JY \quad (6)$$

对 (4) 式进行数值计算表明, 有如下近似关系

$$d^* \propto HJ^{0.164} \quad (7)$$

$$d^* \propto \lambda^{*0.006} \quad (8)$$

$$d^* \propto \epsilon^{0.570} \quad (9)$$

对于 (9) 式我们并不感兴趣。因为我们并不知道 ϵ 和 R 的关系, 而得出 $d^* \sim Re$ 关系才是我们的目的。王健等^[3]的实验表明: SMD 与压力有如下关系

$$SMD \propto p^{-0.164} \quad (10)$$

而 Bachalo^[4]的实验指出

$$u \propto p \quad (11)$$

综合 (5)、(10)、(11) 式有

$$d^* \propto R^{-0.180} e \quad (12)$$

(8) 式说明 d^* 和 λ^* 关系不大。甩油盘均方差 σ 经估算在 0.10~0.08 左右, 可将 (6) 式写为

$$\bar{d}^* \propto \frac{HJ^{0.164}}{Re^{0.180}} \quad (14)$$

这和文献 [5~7] 的实验: $SMD^* \propto \mu^{0.160}$; $SMD^* \propto \mu^{0.200}$; $SMD^* \propto \mu^{0.215}$ 是一致的 (见图 2)。另外 d^* 和 μ 的关系也和文献 [4] 的实验相吻合。从而证明了我们的计算结果。

3 甩油盘雾化分析

将 (3) 式分开写就是

$$\frac{SMD}{r_0} \propto \frac{\left[\frac{T}{\rho_L r_0^3 (2\pi\omega)^2} \right]^{0.164}}{\left(\frac{\rho_L r_0 u}{\mu} \right)^{0.180}} \quad (15)$$

甩油盘出口压力可以写成

$$p = \frac{\int_{R_1}^{R_2} \rho_L \omega^2 R r^2 dR}{r^2} = \rho_L d \omega^2 R \quad (16)$$

综合 (11)、(15)、(16) 式, 有

$$SMD \propto \frac{T^{0.164} \mu^{0.180} r_0^{0.328}}{\rho_L^{0.524} d^{0.180} R^{0.180} \omega^{0.687}} \quad (18)$$

式 (18) 对甩油盘参数对 SMD 的影响有了很详尽的描述。它表明增加转速、减少孔径是提高雾化质量最有效的手段。一般来说 ω 在 5000rad/s 左右, 因为 ω 影响 SMD 的指数仅为 -0.687。当 $\omega > 1500$ rad/s 时, 提高转速 SMD 变化已不太大。如按式 (18) 计算某发动机甩油盘的雾化: 在 $\omega = 1000$ rad/s 时 $SMD = 60\mu\text{m}$, 在 $\omega = 5000$ rad/s 时, $SMD = 20\mu\text{m}$; 当 $\omega = 10000$ rad/s 时, $SMD = 12\mu\text{m}$ 。(这个结果和文献 [8] 给的参数是一致的) 将转速从 5000rad/s 提高到 10000rad/s, SMD 仅提高了 $8\mu\text{m}$, 而这对雾化质量并没有太大提高。而在工艺上实现 5000rad/s 的提高却相当困难。孔径 r_0 也不宜太小, 一般在 1~2mm 之间, 孔径过小时无法提高流量, 限制了流量的提高也就限制了发动机的功率。另外甩油盘半径 R 和甩油盘小孔的长度 b 也不宜太大, 这主要是从工艺上考虑。不过从 (18) 式也可看出提高 R 和 b 对提高雾化质量并无多大好处。对燃油的选择而言, 单从雾化效果上看, 当然是黏度 μ 、表面张力系数 σ 越小越好, 密度 ρ 越大越好。提高燃油温度也是一种提高雾化质量可选择的方案, 因为粘度和表面张力系数都随着油温的升高而下降, 这对雾化是有好处的。

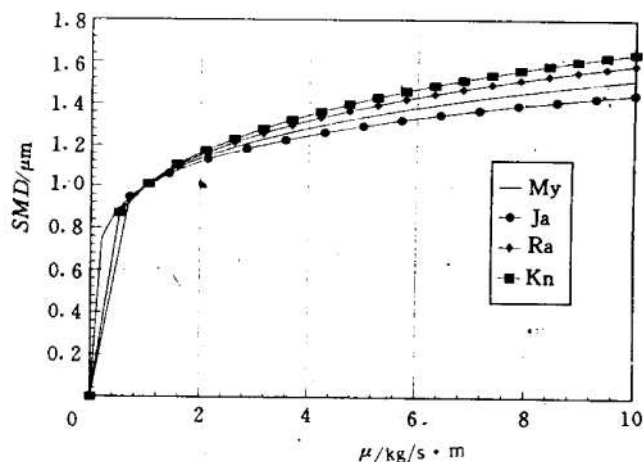


Fig 2 The relationship between SMD and μ

4 结 论

(1) 甩油盘的半径 R 、孔的长度 b 及转速 ω 都和索太尔直径 SMD 成反比 (见图 3)。

(2) 提高转速 ω 、减少孔径 R_0 是提高雾化质量最有效的手段, 增大甩油盘半径 R 、孔长 b 可以作为提高雾化质量的辅助手段。

(3) 甩油盘雾化的 SMD 和燃油的表面张力系数 T 、黏度 μ 、转速以及密度 ρ 的关系和其它雾化方式具有一致的形式。

(4) 振动频谱的分析方法对于分析雾化是有效的。

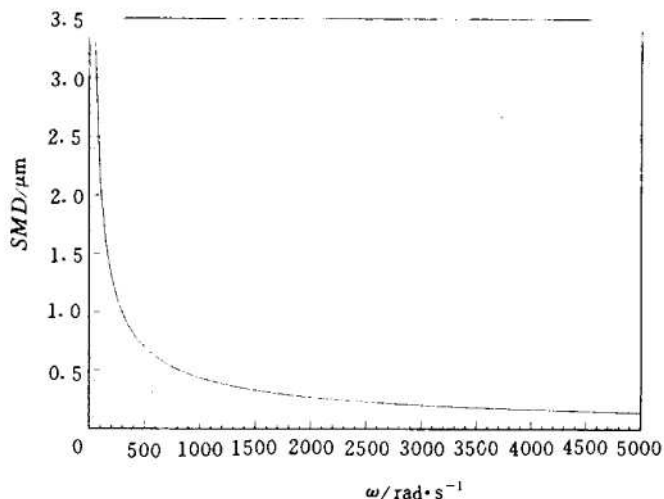


Fig 3 The relationship between SMD and ω

参 考 文 献

- [1] Jia Y Z, Huang Z X. A Method of Calculation for the Radius of Droplets of Shower Feed Fuel Combustor. A. P. C. E. U paper, 1993, A077
- [2] 邦达拉·丘克. 冲压发动机原理. 北京: 国防工业出版社, 1956
- [3] 王健, 王家骅. 高密度喷气燃料和常规燃料的油雾场对比试验研究. 北京宇航学会冲压发动机技术发展研讨会, KF/YH92-070-18, 1992
- [4] Bachalo W D, Houser M J. Evolutionary Behavior of Sprays Produced by Pressure Atomizers. AIAA-86-0296, 1986
- [5] Jasuja A K. Atomization of Crude and Residual Fuel Oils. ASME Paper 78/GT/83, Presented at ASME Gas Turbine Conference, London, 1978
- [6] Radcliffe A. Fuel Injection, sec. D, Vol XI. High Speed Aerodynamics and Jet Propulsion, Princeton Un. Press, Princeton, N. J., 1960
- [7] Knight B E. The Performance of a Type of Swirl Atomizer. Proc. Inst. Mech. Eng., 1955, 169
- [8] 作者不详. 涡轮轴技术. 北京: 蓝天出版社, 1993