

# 压力旋流喷雾理论与喷雾 粒度特性的探讨\*

鲁 定 远

(上海纺织工业设计院, 1985年4月4日收到)

## 摘 要

本文试图以实验观察的压力旋流喷雾工况为依据, 提出关于压力旋流喷射雾化机理的模型设想——压力旋流喷射锥膜雾化理论。在一些基本假定条件下, 导出压力旋流喷雾粒度特性关系式: ( $d_s$ 的单位为米)

$$d_s = k_d \cdot \left[ \frac{3}{4\pi} \frac{g}{\gamma} \cdot \frac{\sigma}{\eta_B^2} \cdot \frac{\phi^2}{w_{CT}^2} \cdot \cos^2\theta \right]^{1/3}$$

上述理论与所导出的关系式基本上同实际喷雾工况相符合, 依此能对实际的喷雾工况进行较好的解释。

本文还对国内电厂使用的一些油喷雾咀的喷雾粒度特性进行理论计算, 以同实验数相对照, 结果表明理论对实践有一定的价值, 可供有关方面参考。

## 一、概 述

在现代的一些生产过程中, 通常包含有一个工质流体的交换过程, 如: 传热、传质、燃烧、吸收、化合等过程。为了提高交换过程的工作效果, 要求工质液体在参与交换工作过程中尽可能具有较大的交换表面积。雾化是将工质液体转变成细小分散的液滴流动, 依此获得较大的交换表面积。液体的雾化通常是借用雾化器来实现。通常, 有四种基本雾化方式: 即高压细孔喷射雾化; 压力旋流喷射雾化; 机械旋转雾化; 气流喷射雾化 (又可进一步部分为: 引射式和混射式两种)。

压力旋流喷射雾化简称旋流雾化, 是现代雾化技术中最简单的一种基本雾化方式。它藉工质液体的压力头作用, 经旋流装置产生旋流, 再经喷咀作旋流喷射形成雾化。它在工业中各种液体雾化方面应用最为普遍。例如: 奶粉、药物等制造工艺中的喷雾干燥, 喷雾蒸发; 给水除氧器中的水喷雾; 通风调节工程中的喷水冷却; 锅炉和燃气轮机燃烧装置中的油喷雾燃烧等等。

雾化的质量好坏通常用下面一些特性表示, 如: 粒度的大小, 均匀度和分散度。其中, 特别是粒度大小是最重要的特性, 它直接关系到雾化的质量, 对生产工艺过程的交换效果有

\* 钱伟长推荐。

极大的影响,但是,至今对雾化的机理和粒度的大小方面的研究还很少.通常用工业性标定试验——采用概率计算方法的索太尔平均直径(SMD)来表明雾化粒度大小.

$$d_{\text{SMD}} = \frac{\sum n_i \cdot d_i^3}{\sum n_i \cdot d_i^2}$$

式中:  $d_{\text{SMD}}$  为雾化粒度的索太尔平均直径;  $n_i$  为试验中获取的雾化粒度数目;  $d_i$  为试验中获取的雾化粒度直径.

这对于全面地深入了解雾化规律是很不够的.

本文试图从压力旋流喷射实验工况出发,探讨旋流喷射雾化的机理,由此提出关于压力旋流喷雾模型的设想——旋流喷射锥膜雾化理论,并在一些基本假定条件下,从理论上求出:旋流喷雾粒度特性的公式.根据这一公式就能对旋流喷雾粒度的各种影响因素及其作用程度进行分析说明,并与实验工况对照,证实这一理论公式的正确性.由此可作为生产实践的指导.

## 二、实 验 工 况

由压力旋流喷射雾化的实验工况,可观察到压力旋流喷雾的工作过程有如下一些工况特征,见图1所示.

1. 在旋流喷射工作压力较低,喷射速度较小时,工质液体在喷咀出口呈现麻花状绞股状流动,见图1(a)所示.

2. 随着工作压力升高,喷射速度增大,工作液体在喷嘴出口就会出现一个呈中空收口的泡形流动,见图1(b)所示.

3. 当工作压力继续开高,旋流喷射速度继续增大,工质液体在喷咀出口开始形成一个渐扩开口的旋流喷射圆锥薄膜状流动,见图1(c)所示.

4. 工作压力和相应的喷射速度再继续增大,工质液体在喷咀出口所形成的旋流喷射圆锥膜流就得到加强,随着喷射速度的增大,旋流喷射圆锥直径就不断增大,相应的喷射锥膜厚度就不断变薄,直到旋流喷射锥膜破坏形成雾化流动,见图1(d)所示.

5. 再继续加大工作压力,旋流喷射速度也相应加大,此时工质液体在喷咀出口所形成的旋流喷射锥膜雾化就更为强烈,喷锥角就不再增大,而趋于一个定值,形成一个稳定的雾化,但其雾化液滴的粒径不断减小,见图1(e)所示.

6. 如果工作压力再继续增大,喷射速度很大时,则在喷咀出口形成的旋流喷射锥膜雾化就更为强烈,而且会在喷咀出口附近呈现出汽雾现象,见图1(f)所示.

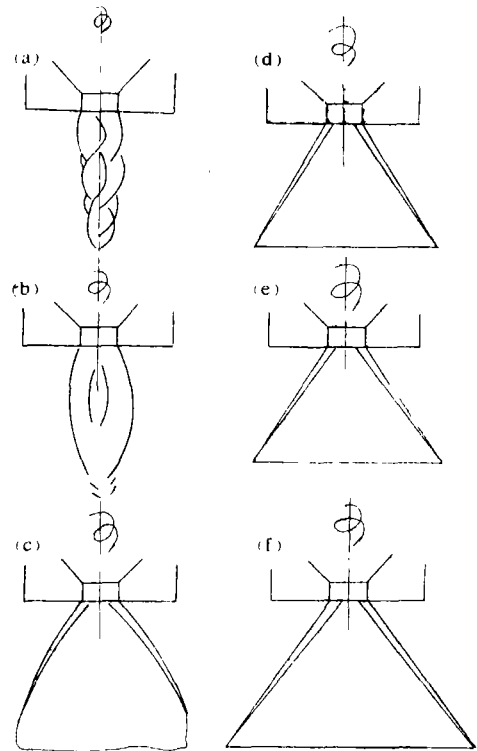


图1 旋流喷雾实验工况示意图

### 三、旋流喷射雾化模型——锥膜雾化理论

从实验工况出发，提出如下关于压力旋流喷雾机理模型的设计：认为旋流喷雾是依靠工质流体的压力头，经旋流装置产生旋流，再经喷咀作旋流喷射。由于旋流离心力的作用，在喷咀内部旋流断面中心会形成旋涡空隙，这一现象称之为旋流效应。在喷咀出口断面上喷雾的充满情况可用喷咀的断面系数  $\phi$  表示（见图2）。

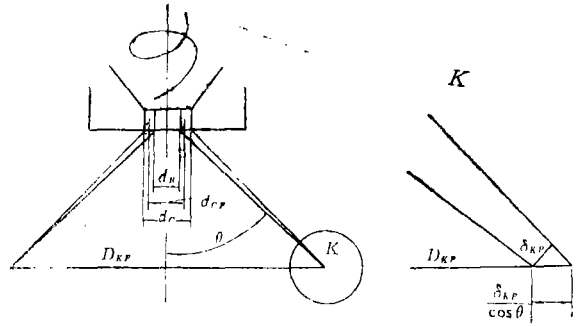


图2 旋流喷雾工况分析示意图

$$\phi = 1 - f_B/f_c = 1 - d_B^2/d_c^2 \leq 1 \tag{3.1}$$

式中： $d_B$ 与 $f_B$ 为喷雾咀出口中心处旋涡空隙的直径（单位为米）与面积（单位为米<sup>2</sup>）：

$$f_B = \pi d_B^2/4$$

$d_c$ 与 $f_c$ 为喷雾咀出口的直径与面积：

$$f_c = \pi d_c^2/4$$

在喷咀出口，旋流喷射的离心力将克服液体的表面张力，在空间中就形成一个中空的旋流喷射圆锥薄膜状流动，随着旋流喷射锥膜流动断面直径的增大，相应的旋流喷射锥膜厚度就不断减薄。在稳定雾化工况条件下，旋流喷射锥膜厚度减薄至一定厚度时，旋流喷射锥膜的离心力与锥膜表面的收缩张力相平衡，旋流喷射锥膜直径就不再增大，锥膜厚度也就不再减薄，此时在外界雾化力（如旋流喷射的脉动和不均匀性、空间介质的阻力、以及振动等）作用下，旋流喷射锥膜就被破坏，形成碎膜，在液体表面张力作用下形成细小的球形液滴作分散流动，达到雾化。这一旋流喷射雾化机理称之为旋流喷射锥膜雾化理论。

在上述稳定雾化工况下，当旋流喷射锥膜开始被破坏，形成雾化液滴时，这一旋流喷射的最大锥膜直径称之为临界锥膜直径，用 $D_{kp}$ 表示。与此相应的锥膜厚度称为临界锥膜厚度，用 $\delta_{kp}$ 表示。旋流喷射锥膜与喷轴方向之间的夹角称之为喷雾角，即雾化角，用 $\theta$ 表示。旋流喷射锥膜破坏，形成细小分散的液滴粒径称之为喷雾粒度。即雾化粒度；用 $d_s$ 表示。

图2为旋流喷射雾化工况的分析示图。由图2可知：旋流喷射在喷咀断面上的分布情况。

旋流喷射中心旋涡空隙直径，即旋流喷射内部自由表面的直径 $d_B$ （单位：米）

$$d_B = d_c \cdot \sqrt{1 - \phi} \tag{3.2}$$

旋流喷射旋流厚度（单位：米）：

$$\delta_c = \frac{d_c - d_B}{2} = d_c \cdot \frac{1 - \sqrt{1 - \phi}}{2} \tag{3.3}$$

旋流喷射旋流的平均直径（单位：米）：

$$d_{cp} = \frac{d_c + d_B}{2} = d_c \cdot \frac{1 + \sqrt{1 - \phi}}{2} \tag{3.4}$$

旋流喷射中心旋涡空隙面积（单位：米<sup>2</sup>）：

$$f_B = \pi d_B^2/4 = f_c(1 - \phi) \tag{3.5}$$

旋流喷射液流的截面积  $f_{c\phi}$ （单位：米<sup>2</sup>）：

$$f_{c\phi} = f_c - f_B = \phi \cdot f_c \tag{3.6}$$

## 四、一些基本假定

**假定 1** 工质液体的流动满足贝努利方程:

$$p/\gamma + z + w^2/2g = \text{常数} \quad (4.1)$$

式中:  $p$  为压力(公斤/米<sup>2</sup>),  $\gamma$  为比重(公斤/米<sup>3</sup>),  $z$  为势位(米),  $w$  为速度(米/秒),  $g$  为重力加速度(米/秒<sup>2</sup>)

**假定 2** 工质液体在流动过程中, 旋流喷射在同一轴向流动断面上各点的轴向流动速度相等, 可用轴向流动断面上平均速度表示。由此, 在喷咀出口断面上旋流喷射的轴向喷射速度(单位为米/秒):

$$w_{c_n\phi} = w_{B_n\phi} = w_{c_n}/\phi \quad (4.2)$$

式中:  $w_{c_n\phi}$  与  $w_{B_n\phi}$  为喷咀出口断面上直径为  $d_c$  与  $d_B$  处旋流喷射的轴向喷射速度(单位为米/秒);  $w_{c_n}$  为整个喷雾咀断面上, 旋流喷射的平均轴向喷射速度。

$$w_{c_n} = G/(3600\gamma f_c)$$

式中:  $G$  为流量(公斤/时)。

**假定 3** 工质液体在作旋流喷射过程中, 旋流喷射满足动量矩守恒规律。由此, 在旋流喷射锥膜流动过程中:

$$w_{c_T}d_c = w_{KPT}D_{KP}$$

由此可得锥膜临界直径处的切向旋流分速度:

$$w_{KPT} = d_c w_{c_T} / D_{KP} \quad (4.3)$$

式中:  $w_{c_T}$  为在喷咀断面上旋流喷射外表面处的切向旋流速度。

$$w_{c_T} = A_c w_{c_n} \quad (4.4)$$

$A_c$  为旋流喷咀的旋流系数, 它仅确定于旋流喷咀的结构特性。

对雾化片型式的旋流喷咀  $A_c = \pi d_c D_K / (4mab)$

对旋流芯型式的旋流喷咀  $A_c = \pi d_c D_K \text{tg} \beta / (4mab)$

对涡流型式的旋流喷咀  $A_c = d_c D_K / D_0^2$

**假定 4** 工质液体为不可压缩性流体, 在连续流动过程中各流动断面上的容积流量保持不变。因此, 在旋流喷射时锥膜流动过程中:

$$w_{c_n\phi} \cdot f_{c\phi} = w_{KPN} \cdot f_{KPN} \quad (4.5)$$

式中:  $w_{KPN}$  为在旋流喷射临界直径处的轴向流动速度,  $f_{KPN}$  为旋流喷射临界直径处锥膜的轴向截面积。

**假定 5** 在工质液体流动过程中, 对于液体粘性摩擦损失的影响作用, 采用对流动速度进行修正的方法予以考虑。因此, 在旋流喷射临界直径处锥膜的轴向流动速度:

$$w_{KPN} = \eta_B \cdot w_{c_n\phi} \quad (4.6)$$

式中:  $\eta_B$  为旋流喷射锥膜流动过程中, 考虑空间介质粘性摩擦的影响, 对流动速度的修正系数。它与旋流喷射锥膜形状、流动特性以及周围空间介质等情况有关。对通常的旋流喷咀, 在稳定雾化工况下,  $\eta_B$  可按下式计算:

$$\eta_B = 1 - 1.95/Re_B^2 \quad (4.7)$$

式中:  $Re_B$  为旋流喷射锥膜流动的雷诺数  $Re_B = w_{c_n\phi} \cdot D_{KP} / \nu_B \approx 4 \cdot w_{c_n} \cdot d_c / \nu_B$

此处： $\nu_B$  为空间介质的运动粘度 ( $m^2/s$ )。B 为一系数。考虑旋流喷射锥膜的形状和流动特性，工质液体和周围空间介质等因素，其值可由实验确定。在通常情况下，可取用： $B \approx 0.18$ 。

**假定 6** 在稳定雾化工况下，旋流喷射在旋流离心力的作用下形成锥膜流动过程中，达到临界锥膜直径  $D_{KP}$ ，和相应临界锥膜厚度  $\delta_{KP}$  时，由外界雾化力扰动下，旋流喷射圆锥薄膜就被破坏形成碎片。它的平均大小：

$$\Delta V = \delta_{KP} \cdot \Delta S \cdot \Delta l$$

式中： $\Delta S$  为碎膜片的圆周方向长度。它可用下式表示：

$$\Delta S = k_s \cdot \delta_{KP}$$

此处  $k_s$  为  $\Delta S$  相对  $\delta_{KP}$  的倍率。 $\Delta l$  为喷射方向锥膜碎片的长度。它可用下式表示：

$$\Delta l = k_l \cdot \delta_{KP}$$

此处  $k_l$  为  $\Delta l$  相对  $\delta_{KP}$  的倍率。由此可得：

$$\Delta V = k_s \cdot k_l \cdot \delta_{KP}^3$$

在液体表面张力的作用下，所形成的碎膜片将成为球形液滴。它的大小可用下式表示

$$\Delta V = \pi d_z^3 / 6$$

由此可得雾化液滴的粒径 (单位米)

$$d_z = k_d \cdot \sqrt[3]{6/\pi} \cdot \delta_{KP} \tag{4.8}$$

式中： $k_d = \sqrt[3]{k_s \cdot k_l}$  称之为旋流喷雾的粒度系数。它与工质液体的性质、周围介质的性质、喷嘴直径、喷射速度以及外界雾化力扰动作用的大小有关。液体粘度越大和外界扰动作用越大，则雾化的粒度系数也就越大。其值可由实验确定。在通常情况下，可取用下列数值：水： $k_d \approx 2.5$ ，油： $k_d \approx 5$ 。

### 五、旋流喷雾粒度的确定

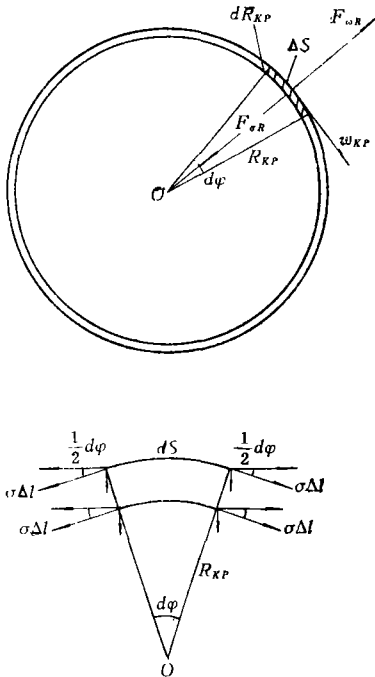


图3 旋流喷射锥膜在临界直径处的作用力分析图

从前述旋流喷雾机理可以知道：在稳定雾化工况条件下，旋流喷射锥膜流动达到临界锥膜直径  $D_{KP}$  时，旋流喷射锥膜所产生的离心力就与锥膜表面张力产生的向内收缩力相平衡。

$$F_{\omega R} = F_{\sigma d} \tag{5.1}$$

根据这一关系式，就可确定锥膜的临界厚度  $\delta_{KP}$ ，并应用基本假定 6 就能确定雾化粒度  $d_z$ 。求导如下：

设旋流喷射锥膜流动在临界直径  $D_{KP}$  处的流动断面 (如图 3 所示) 厚度为  $\delta_{KP}$  的圆环，它的径向长度  $dR_{KP} = \delta_{KP} / \cos \theta$ 。现在此薄膜圆环上取一微元膜片，在圆周方向上的长度为  $\Delta S$ 、在喷射方向上的长度为  $\Delta l$ 。由此，这一微元的体积：

$$\Delta V = \delta_{KP} \cdot \Delta S \cdot \Delta l.$$

微元上所作用的离心力：

$$F_{\omega R} = \frac{\gamma}{g} \cdot \Delta V \cdot \frac{\omega_{KP}^2}{R_{KP}} = 2 \frac{\gamma}{g} \omega_{KP}^2 \cdot \frac{\delta_{KP}}{D_{KP}} \Delta S \cdot \Delta l \tag{5.2}$$

式中： $g$  为重力加速度 ( $m/s^2$ )， $\gamma$  为工质液体的比重 ( $kg/m^3$ )

由表面张力所产生向内收缩力的合力:

$$F_{\sigma R} = 4\sigma \cdot \Delta l \cdot \sin \frac{1}{2} d\phi \quad (5.3)$$

式中  $\sigma$  为工质液体的表面张力系数(公斤/米)。由于微元体很小, 可取:

$$\sin \frac{1}{2} d\phi \approx \frac{1}{2} d\phi; \quad d\phi \approx \frac{\Delta s}{R_{KP}}$$

代入可得:

$$F_{\sigma R} = 4\sigma \frac{1}{D_{KP}} \cdot \Delta s \cdot \Delta l \quad (5.4)$$

根据条件关系式  $F_{w_k} = F_{\sigma k}$

$$2 \frac{\gamma}{g} w_{KPT}^2 \cdot \frac{\delta_{KP}}{D_{KP}} \Delta s \cdot \Delta l = 4\sigma \cdot \frac{1}{D_{KP}} \Delta s \Delta l.$$

由此可得: 临界锥膜厚度 (单位: 米)

$$\delta_{KP} = 2g \frac{\sigma}{\gamma} \cdot \frac{1}{w_{KPT}^2} \quad (5.5)$$

根据前述基本假定 3~5 可得:

$$\delta_{KP} = \left[ \frac{1}{8} \frac{\sigma}{g} \frac{\phi^2}{\eta_B^2} \cdot \frac{d_c}{w_{cT}^2} \right]^{1/3} \quad (5.6)$$

再根据基本假定 6, 整理可得雾化粒度直径 (单位: 米)

$$d_z = k_d \left[ \frac{3}{4\pi} \frac{\sigma}{g} \cos^2 \theta \cdot \frac{\phi^2}{\eta_B^2} \cdot \frac{d_c^2}{w_{cT}^2} \right]^{1/3} \quad (5.7)$$

上述旋流喷雾关系式还可表达为如下一些形式:

以旋流喷咀的平均轴向喷射速度  $w_{cn}$  表示

$$d_z = k_d \left[ \frac{3}{4\pi} \frac{\sigma}{g} \frac{\phi^2}{\eta_B^2 \cdot A_c^2} \cdot \frac{d_c^2}{w_{cn}^2} \cos^2 \theta \right]^{1/3} \quad (5.8)$$

以旋流喷咀的通流量  $G$  表示

$$d_z = k_d \cdot 15\pi d_c^2 \left[ 18g\gamma\sigma \cdot \cos^2 \theta \cdot \frac{\phi^2}{\eta_B^2 \cdot A_c^2} \cdot \frac{1}{G^2} \right]^{1/3} \quad (5.9)$$

以旋流喷咀的工作压力  $\Delta p$  表示

$$d_z = k_d \left[ \frac{3}{8\pi} \frac{\sigma}{\eta_B^2 \cdot \eta_c^2 \cdot A_c^2} \left( \frac{\phi}{2-\phi} \right) \cdot \frac{1}{\Delta p} \cdot \cos^2 \theta \right]^{1/3} \quad (5.10)$$

以无因次准则方程表示,

$$We = \left( \frac{4}{3} \pi \frac{1}{k_d^3 \cdot \cos^2 \theta} \cdot \frac{A_c^2 \cdot \eta_B^2}{\phi^2} \right) \frac{Re_z^2}{Ga} \cdot \left( \frac{d_z}{d_c} \right)^2 \quad (5.11)$$

式中  $We$  为韦伯数  $We = \frac{\sigma}{\gamma \cdot d_z^2}$ ;  $Re_z$  为雷诺数  $Re_z = \frac{w_{cn} \cdot d_z}{\nu}$ ;

$Ga$  为伽利略数  $Ga = \frac{g \cdot d_z^3}{\nu^2}$ .

## 六、实验验证

从上述导出的喷雾粒度关系式表明, 喷雾粒度  $d_z$  与下列一些因素有关:

1. 工质液体物性的影响主要反映于工质液体的比重  $\gamma$ , 表面张力系数  $\sigma$ 、与粘度  $\nu$  等三个物性参数。工质液体的比重  $\gamma$  越大; 表面张力系数  $\sigma$  越小, 液体粘度  $\nu$  越小, 则旋流喷雾粒度  $d_z$  也就越细小, 而且, 其中主要确定于工质液体的粘度  $\nu$ 。

2. 雾化空间介质的影响主要反映空间介质的粘度  $\nu_B$ 、物性参数。空间介质粘度  $\nu_B$  越小, 流动的速度损失也就越小,  $\eta_B$  就越大, 则旋流雾化粒度也越小。

3. 旋流喷咀直径  $d_c$  的影响, 喷咀直径  $d_c$  越小, 则旋流喷雾粒度  $d_z$  也就越小。由此可知: 小喷咀可获得较小的雾化粒度。

4. 旋流喷咀结构的影响主要反映于喷咀的旋流系数  $A_c$ 。喷咀的旋流系数  $A_c$  越大, 喷咀的充满度系数  $\phi$  就越小, 旋流喷雾角  $\theta$  就越大, 其结果使旋流喷雾粒径  $d_z$  就越小。由此可知: 大喷咀直径为了取得较小的喷雾粒径, 可采用较大的旋流系数来实现。

5. 旋流喷雾工作压头  $\Delta p$  的影响,  $d_z \propto \Delta p^{-1/3}$ 。因此, 工作压头  $\Delta p$  越大, 相应的喷射速度就越大, 则喷雾粒度  $d_z$  就越细小。由此可知: 欲取得较小的喷雾粒度, 可采用较高的喷雾压头来实现。例如, 由于油的粘度较大, 燃料油的雾化就较困难, 故通常采用较高的喷射压力来达到所需要粒度要求。

上述这些理论关系式的分析结果, 从定性方面看, 同实验观察的结果相一致的。如图 4 所示。

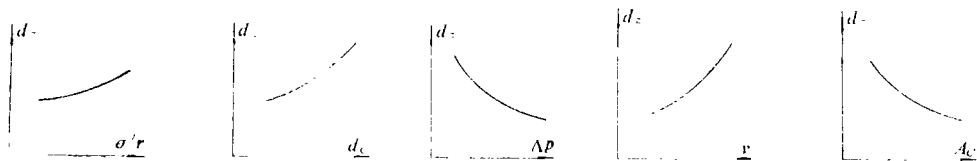


图 4 各种参数对雾化粒度的影响

根据国内公布的一些油喷雾咀结构特性和旋流喷雾粒度的冷态测试数据, 同本文提出的旋流喷雾机理理论所导出的雾化粒度关系进行计算结果与之对照比较, 列述于表 1、表 2 中<sup>[1]</sup>。

从对照可见, 根据本文提出的旋流喷射锥膜雾化理论所导出的雾化粒度关系式之计算结果, 与实验测试数据的差值大小, 是在目前工业性测试偏差范围内。因而, 本文所导出的雾化粒度关系式对指导实践有一定的参考价值。可为设计、改进、分析和合理选择压力旋流喷雾咀的结构和工况, 以取得良好的雾化粒度特性, 提供了一个理论的依据。

## 七、说 明

必须指出: 上述所导出的旋流喷雾粒度关系式是根据旋流喷射锥膜雾化这一简单的物理模型和一些基本假定条件下取得。而且, 本文所探讨的内容是研究工质液体经旋流喷咀作旋

流喷雾的过程（这一雾化称之为一次雾化）它主要考虑旋流离心力的作用。实际上，影响雾化的因素很多。于此将其它一些影响因素都归结到一些系数中去。

还必须指出，在实际喷雾过程中，工质液体经旋流喷咀作旋流喷雾，在喷射速度较大时，喷雾液滴在空间介质中作高速运动，会进一步雾化成更细小的液滴。（这一雾化方式称之为二次雾化）。此外，在多喷咀工作和不稳定雾化情况下，雾化液滴会在空间中发生相互作用，发生碰撞和併合的情况，从而使情况更为复杂。这些问题本文暂不作讨论，于此谨提出注意。

## 附 录

从上述压力旋流喷射锥膜雾化机理出发，可以推导出下面一些旋流喷雾特性关系式：

1. 旋流喷咀的工质流量（单位：公斤/时）：

$$G = 3600 \gamma f_c \cdot w_{cn} \quad (\text{A} \cdot 1)$$

2. 在整个喷咀断面上旋流喷射的平均轴向喷射速度（单位：米/秒）：

$$w_{cn} = \mu \cdot \sqrt{2g \frac{\Delta p}{\gamma}} \quad (\text{A} \cdot 2)$$

式中： $\Delta p$  为旋流喷射的工作压头（公斤/米<sup>2</sup>）； $\mu$  为旋流喷咀的流量系数。

3. 旋流喷咀的流量系数：

$$\mu = \eta_c \cdot \phi \cdot c_\phi \quad (\text{A} \cdot 3)$$

式中： $\phi$  为旋流喷咀断面上工作液体的旋流喷射的充满系数。 $c_\phi$  为旋流喷咀的速度系数

$$c_\phi = \sqrt{\frac{\phi}{2 - \phi}} \quad (\text{A} \cdot 4)$$

$\eta_c$  为在喷咀内考虑工作液体粘度影响的速度修正系数

4. 喷咀内的速度修正系数：

$$\eta_c = 1 - \frac{1.05}{Re_c} \quad (\text{A} \cdot 5)$$

式中： $Re$  为旋流喷咀流动的雷诺数

$$Re = \frac{w_c \cdot d_c}{\nu}$$

$w_c$  为在整个旋流喷咀断面上的旋流速度（米/秒）

$$w_c = \sqrt{w_{cn}^2 + w_{cT}^2} = w_{cn} \cdot \sqrt{1 + A_c^2} \quad (\text{A} \cdot 6)$$

$\nu$  为工作液体的运动粘度（米<sup>2</sup>/秒）

$c$  为系数，考虑工作液体粘度和旋流喷咀结构的水力特性，它可由实验确定。在通常情况下，可取  $c \approx 0.18$ 。

5. 旋流喷咀断面上工作液体的旋流喷射充满系数：

$$\phi = \eta_A \cdot \phi_0 \quad (\text{A} \cdot 7)$$

式中： $\phi_0$  为理想旋流喷射喷咀断面的

充满系数

$$\phi_0 = f(A_c)$$

即：

$$A_c = \frac{1 - \phi_0}{\sqrt{\frac{\phi_0^2}{2}}} \quad (\text{A} \cdot 8)$$

$\eta_A$  为充满系数的修正值，（见文献[7]）

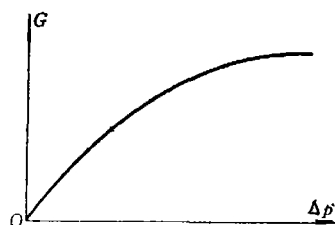


图 5 旋流喷咀的工作流量



表 1

国内一些电厂的油喷雾咀

喷嘴型号			1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#	9#	10#	11#	12#	13#
名称	符号	单位													
结构数据	$d_c$	毫米	4.32	5.0	4.0	3.0	3.44	3.94	4.52	5.0	4.0	5.1	4.44	4.44	5.0
	$D_K$	毫米	16.92	15.5	14.7	7.5	7.34	7.24	6.96	7.34	7.6	20.0	16.0	20.0	12.5
	$m$	毫米	4	4	4	4	4	4	4	4	6	6	4	4	4
	$a$	毫米	3.16	2.66	2.36	1.70	1.78	2.00	1.98	2.58	2.30	2.5	/	/	2.38
测试数据	$\Delta p$	表压	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
	$G$	公斤/时	1109	1440	1008	598	865	1060	1070	1450	1195	1510	2000	1640	1210
	$\theta$	度	35.2	37.2	34.8	35.9	36.7	37.5	38.7	42.5	37.3	41.8	33.8	35.4	49.5
	$d_{SMD}$	毫米	0.175	0.182	0.152	0.141	0.169	0.172	0.151	0.157	0.124	0.126	0.207	0.175	0.142
理论计算结果数据	$A_c$	/	1.76	1.76	1.56	1.64	1.41	1.49	1.75	1.40	0.984	1.78	1.42	2.25	2.65
	$\phi_0$	/	0.522	0.522	0.550	0.535	0.565	0.560	0.523	0.565	0.645	0.520	0.565	0.480	0.445
	$\mu_M$	/	0.310	0.310	0.335	0.325	0.360	0.350	0.310	0.360	0.445	0.306	0.360	0.265	0.236
	$Re$	$\times 10^4$	1.50	1.74	1.37	1.04	1.19	1.37	1.57	1.73	1.39	1.77	1.54	1.605	1.85
	$\eta_\phi$	/	1.0910	1.0870	1.0930	1.0990	1.0960	1.0930	1.0890	1.0870	1.0930	1.0870	1.0897	1.0887	1.0857
	$\phi$	/	0.570	0.567	0.602	0.588	0.620	0.613	0.569	0.614	0.705	0.565	0.616	0.522	0.484
	$c_\phi$	/	0.631	0.629	0.657	0.646	0.670	0.665	0.631	0.666	0.740	0.628	0.668	0.603	0.565
	$\eta_c$	/	0.814	0.819	0.810	0.801	0.806	0.810	0.815	0.819	0.811	0.819	0.815	0.816	0.812
	$\mu$	/	0.289	0.292	0.321	0.305	0.335	0.330	0.293	0.335	0.423	0.290	0.335	0.257	0.222
	$\theta$	度	40.7	40.9	38.5	39.5	37.2	37.7	40.7	37.3	30.5	41.0	37.5	43.7	45.9
	$\eta_B$	/	0.723	0.730	0.718	0.703	0.710	0.718	0.725	0.730	0.719	0.732	0.724	0.726	0.733
	$w_{cn}$	米/秒	21.3	21.5	23.7	22.5	24.7	24.4	21.6	24.7	31.3	21.4	24.7	19.0	16.4
	$w_{cT}$	米/秒	37.5	37.8	37.0	36.9	34.8	36.4	37.8	34.6	30.3	38.1	35.1	42.8	43.5
	$d_{z0}$	毫米	0.0300	0.0324	0.0319	0.0251	0.0304	0.0316	0.0306	0.0382	0.0427	0.0326	0.0350	0.0250	0.0244
$k_d$	/	5.83	5.62	4.76	5.61	5.55	5.45	4.93	4.12	2.91	3.87	5.92	7.00	5.82	
喷嘴型号			14#	15#	16#	17#	18#	19#	20#	21#	21#	22#	23#	24#	25#
名称	符号	单位													
结构数据	$d_c$	毫米	4.68	5.6	7.5	4.5	5.0	3.34	4.5	3.0	3.0	3.0	3.7	4.5	4.5
	$D_K$	毫米	16.1	17.4	25.0	21.8	16.1	9.0	17.0	8.0	8.0	10.0	16.0	7.0	7.34
	$m$	毫米	6	6	4	4	2 $\times$ 3	2 $\times$ 5	6	3	3	4	4	4	4
	$a$	毫米	/	4.4	4.0	/	/	/	/	/	/	2.2	/	1.98	1.78
测试数据	$\Delta p$	公斤/厘米 <sup>2</sup>	25	30	25	28	25	25	25	25	25	25	25	25	25
	$G$	公斤/时	1610	2680	1770	2050	2610	800	1430	544	544	584	1400	1200	1140
	$\theta$	度	48.5	41.0	51.0	35.0	27.3	35.6	36.2	34.3	34.3	39.0	30.5	43.5	39.0
	$d_{SMD}$	毫米	0.176	0.283	0.144	/	/	0.129	0.238	0.114	0.114	0.109	0.203	0.190	0.255
理论计算结果数据	$A_c$	/	1.66	0.966	3.07	1.72	1.92	1.92	2.16	1.42	1.42	1.41	1.08	1.76	1.84
	$\phi_0$	/	0.535	0.645	0.415	0.525	0.508	0.508	0.485	0.565	0.565	0.565	0.625	0.522	0.515
	$\mu_M$	/	0.325	0.445	0.210	0.315	0.297	0.297	0.275	0.360	0.360	0.360	0.425	0.310	0.304
	$Re$	$\times 10^4$	1.64	2.10	2.82	1.57	1.78	1.19	1.64	1.045	1.045	1.037	1.28	1.56	1.59
	$\eta_\phi$	/	1.0885	1.0833	1.0775	1.0893	1.0868	1.0956	1.0885	1.0990	1.0990	1.0994	1.0940	1.0895	1.0890
	$\phi$	/	0.583	0.699	0.447	0.572	0.553	0.557	0.5376	0.620	0.620	0.621	0.684	0.569	0.560
	$c_\phi$	/	0.642	0.733	0.637	0.633	0.620	0.622	0.608	0.670	0.670	0.672	0.695	0.630	0.625
	$\eta_c$	/	0.817	0.825	0.834	0.815	0.820	0.806	0.821	0.802	0.802	0.801	0.809	0.815	0.816
	$\mu$	/	0.309	0.423	0.200	0.295	0.281	0.279	0.269	0.333	0.333	0.334	0.385	0.292	0.286
	$\theta$	度	35.6	31.0	47.8	40.6	41.8	41.5	42.7	37.2	37.2	37.2	32.3	40.8	41.3
	$\eta_B$	/	0.727	0.740	0.765	0.725	0.731	0.711	0.727	0.704	0.704	0.703	0.714	0.724	0.725
	$w_{cn}$	米/秒	22.6	34.2	14.7	21.8	20.7	20.6	19.8	24.6	24.6	24.7	28.4	21.55	21.1
	$w_{cT}$	米/秒	37.5	33.0	45.2	37.5	39.7	39.7	42.8	34.9	34.9	34.8	30.7	38.0	38.8
	$d_{z0}$	毫米	0.0341	0.0493	0.0278	0.0308	0.0304	0.0235	0.0262	0.0278	0.0278	0.0280	0.0391	0.0304	0.0294
$k_d$	/	5.16	5.74	5.18	/	/	5.50	9.08	4.10	4.10	3.90	5.19	6.25	8.67	

表 2 哈 尔 滨 钢 炉 厂 OH-547-型 油 喷 雾 咀

喷 咀 型 号			-01	-02	-03	-04	-05	-06
名称	符 号	单 位						
结 构 数 据	$d_i$	毫米	2.5	3.5	4.5	5.0	6.0	7.0
	$D_A$	毫米	7.0	9.0	10.0	10.0	10.0	10.0
	$m$	/	3	3	3	3	3	3
	$a$	毫米	2	2	2	3	3	3
	$b$	毫米	3	3	3	3	3.2	3.4
测 试 数 据	$\Delta p$	表压	20	20	20	20	20	20
	$G$	公斤/时	352	605	875	1180	1535	1930
	$\theta$	度	29.0	30.3	30.9	20.9	30.9	31.5
	$d_{SMD}$	毫米	0.225	0.274	0.306	0.370	0.402	0.426
理 论 计 算 结 果 数 据	$A_c$	/	0.76	1.37	1.69	1.45	1.64	1.80
	$\phi_0$	/	0.695	0.580	0.500	0.560	0.535	0.520
	$\mu_M$	/	0.500	0.370	0.290	0.350	0.330	0.310
	$Re$	$\times 10^4$	0.782	1.094	1.42	1.53	1.89	2.22
	$\eta_\phi$	/	1.1064	1.0978	1.0913	1.0900	1.0852	1.0828
	$\phi$	/	0.770	0.636	0.546	0.610	0.581	0.563
	$c_\phi$	/	0.792	0.683	0.613	0.663	0.640	0.626
	$\eta_c$	/	0.790	0.803	0.812	0.815	0.812	0.826
	$\mu$	/	0.482	0.349	0.272	0.329	0.301	0.294
	$\theta$	度	24.7	036.1	42.2	38.0	40.0	41.2
	$\eta_H$	/	0.688	0.703	0.719	0.724	0.734	0.742
	$w_{cN}$	米/秒	31.8	23.0	17.9	21.7	19.9	19.4
	$w_{cT}$	米/秒	24.2	31.5	35.1	31.5	32.7	34.9
	$d_{70}$	毫米	0.0396	0.0341	0.0306	1.0402	0.0413	0.0418
$h_d$	/	5.68	8.04	10.0	9.21	9.72	10.1	

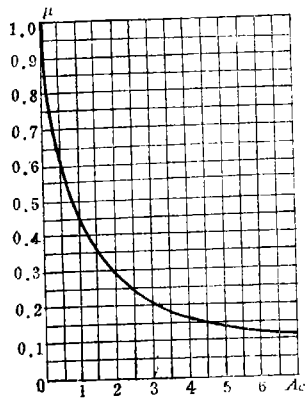


图 6 旋流喷咀的流量系数

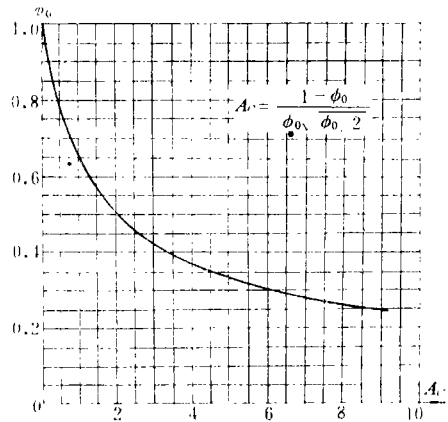


图 7 理想旋流喷射喷咀断面的充满系数

6. 考虑工作液体粘度的喷咀断面充满系数的修正值:

$$\eta_A = 1 + \frac{1}{Re^A} \tag{A.9}$$

式中:  $Re$  为旋流喷咀流动的雷诺数  $Re = \frac{w_c \cdot d_c}{\nu}$

表3 东方锅炉厂DG系列油喷嘴

喷嘴型号			1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#	9#	10#	11#	12#	13#	
名称	符号	单位														
	结构数据	$d_c$	毫米	8.5	7.9	7.4	6.6	6.0	6.1	5.7	6.1	5.3	4.4	3.8	2.5	1.5
		$D_R$	毫米	22.0	22.0	22.0	22.0	22.0	17.5	17.5	18.1	18.0	18.0	7.50	7.50	7.50
		$m$	/	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	3	3
		$a$	毫米	4	4	4	4	4	3.6	3.6	3.3	3.3	3.3	3	3	3
$b$		毫米	3	3	3	3	3	2.5	2.5	2	2	2	2	2	2	
测试数据	$\Delta p$	表压	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	
	$G$	公斤/时	2120	2010	1800	1760	1660	1550	1350	1210	1080	920	700	430	300	
	$\theta$	度	48.5	48.0	45.5	43.5	/	/	/	/	/	41.5	36.0	24.5	22.0	
	$d_{SMD}$	毫米	0.180	0.175	0.171	0.163	0.157	0.154	0.151	0.158	0.165	0.130	0.138	0.120	0.113	
	理论计算结果数据	$A_c$	/	3.06	2.84	2.66	2.37	2.16	2.32	2.17	3.26	2.84	2.36	1.24	0.82	0.622
$\phi_0$		/	0.415	0.435	0.445	0.465	0.485	0.470	0.485	0.414	0.429	0.465	0.597	0.675	0.728	
$\mu_M$		/	0.213	0.230	0.238	0.256	0.274	0.261	0.274	0.204	0.225	0.256	0.390	0.478	0.550	
$Re$		$\times 10^4$	2.89	2.71	2.48	2.15	1.94	2.00	1.86	2.10	1.78	1.43	1.16	0.765	0.476	
$\eta_\phi$		/	1.0768	1.0780	1.0798	1.0808	1.0847	1.0840	1.0855	1.0833	1.0868	1.0911	1.0961	1.1072	1.1204	
$\phi$		/	0.447	0.469	0.480	0.504	0.526	0.510	0.527	0.449	0.466	0.508	0.655	0.747	0.817	
$C_\phi$		/	0.537	0.554	0.562	0.581	0.597	0.585	0.598	0.538	0.552	0.585	0.697	0.772	0.830	
$\eta$		/	0.835	0.833	0.380	0.826	0.822	0.823	0.821	0.829	0.820	0.812	0.805	0.790	0.771	
$\mu$		/	0.200	0.217	0.224	0.242	0.258	0.245	0.259	0.200	0.212	0.242	0.368	0.455	0.522	
$\theta$		度	47.8	46.8	46.1	44.8	43.6	44.4	43.4	47.8	46.6	44.5	33.8	26.9	20.2	
$\eta$		/	0.753	0.751	0.747	0.740	0.735	0.736	0.734	0.740	0.730	0.719	0.709	0.687	0.658	
$W_{c,n}$		米/秒	13.2	14.3	14.8	16.0	17.00	16.2	17.1	13.2	14.0	16.0	24.3	30.0	34.5	
$W_{c,t}$		米/秒	40.4	40.6	39.4	37.9	36.7	37.6	37.1	43.0	39.8	37.8	30.2	24.6	21.4	
$d_{c0}$		毫米	0.0328	0.0328	0.0330	0.0335	0.0338	0.0325	0.0327	0.0267	0.0259	0.0265	0.0384	0.0401	0.0417	
$k_d$		/	5.50	5.35	5.18	4.87	4.65	4.74	4.62	5.92	6.40	4.90	3.60	3.00	2.71	

$A_c$ 为考虑工作液体粘度、旋流喷嘴的结构和喷嘴断面情况的系数。其值可由实验确定。通常，可取  $A_c \approx 0.25 \sim 0.30$ 。

7. 旋流喷射的喷雾角<sup>[3]</sup>

$$\theta = \text{tg}^{-1} 2(1 - \phi) \tag{A.10}$$

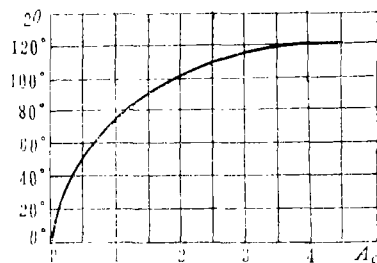


图8 旋流喷射的雾化角  $\theta$

参 考 文 献

- [1] 西安热工研究所, 电厂锅炉机械雾化油喷嘴冷态试验, 热力发电, 7 (1976) .
- [2] 电厂燃油设计编写组, 《电厂燃油设计》, 第一册第十四章, 油喷嘴, 湖北省电力设计院 (1975) .

- [ 3 ] 鲁定远, 压力旋流喷射雾化的喷雾角特性之探讨, 上海纺织工业设计院学术论文 (1979).
- [ 4 ] 岩上惣吉(日本), 重油心一ナの燃烧特性 $\omega$ 及ぼあ各因子の影響, 火力发电, 18, 3 (1967), 29.
- [ 5 ] 化学工学协会日本, 液体の微粒化, 最近の化学工学 (1971年).
- [ 6 ] Giffen E. and A. Maraszyn, *The Atomisation of Liquid Fuels* (1953).
- [ 7 ] Weber, G., Öldruck-zerstäuber-Brenner für Dampfkesselfeuer angen mittlerer and großer Leistung, VGB H106 (1967), 1—11.
- [ 8 ] Прохов А. М., О новом направлении в теории центробежных форсунок, *Теплоэнергетика*, 2 (1963), P26—30.
- [ 9 ] Геллер Э. И. и М. Я. Морошкин, Методика расчета и конструкция центробежных форсунок для распыливания топочных мазутов, *Теплоэнергетика*, 4 (1963), 87.
- [ 10 ] Морошкин М. Я., Расчет коэффициента расхода центробежной форсунки, *Теплоэнергетика*, 12, (1969), 81.
- [ 11 ] Мыков М. В., *Распылительные Сушилка* (1966).
- [ 12 ] Лышевский А. С., *Распыливание Топлива в Судовых дизелях* (1971).
- [ 13 ] Пажи А. Г., *Распыливающие Устойства* (1975).

## Theory of Pressure Swirl Atomisation and Study on the Characteristic of Droplet Size in Atomisation

Lu Ding-yuan

(Shanghai Textile Industry Design Institute, Shanghai)

### Abstract

Based on the observation of the working condition in pressure swirl atomisation experiments, this article tries to suggest a model of the mechanism—the atomisation theory of pressure swirl spray of conical film. Under some basic assumptions, the formula for the characteristic of droplet size of pressure swirl atomisation is derived:

$$d_z = k_d \left[ \frac{3}{4\pi} \frac{\sigma}{\gamma} \frac{\phi^2}{\eta_B} \frac{d_c^2}{w_{CT}} \cos \theta \right]^{1/3}$$

The above theory agrees basically with the actual working conditions in atomisation, and gives the latter a comparatively good interpretation.

In this article, theoretical calculations are worked out for the characteristic of atomised droplet size of some oil atomising nozzles used in power plants in our country (the People's Republic of China) and are compared with actual test data. The results show that the theory is of some value to practice, and it is recommended to those concerned for reference.