

# 压力旋流喷射雾化的喷雾 角特性之探讨\*

鲁 定 远

(上海纺织工业设计院, 1985 年 4 月 18 日收到)

## 摘 要

本文根据提出的旋流喷射锥膜雾化理论, 由旋流喷射的作用力关系, 求导出压力旋流喷射雾化的喷雾角特性关系式:

$$\theta = \operatorname{tg}^{-1} 2 \cdot (1 - \phi)$$

并将各种喷雾角关系式同实验数据进行比较, 结果表明: 本文所导出的喷雾角关系式与实验数据有较好的接近, 而且计算式也较简单, 有一定的实用价值。

## 一、概 述

喷雾器是将工质液体的股流, 以喷射方式使之转变成细小分散液滴流动的一种装置。描述这一过程称之为喷雾。旋流喷雾是利用旋流喷射的作用使之雾化。

压力旋流喷射雾化机理: 旋流喷射雾化是靠工质液体压力头的作用, 经旋流喷咀作旋流喷射。由于旋流离心力的作用产生旋流效应——在喷咀断面中心形成一个中空的旋涡空腔。在喷咀出口, 旋流喷射的离心力克服液体的表面张力, 在空间中形成一个中空的旋流喷射锥膜流动。随着旋流喷射锥膜流动断面直径的增大, 相应旋流喷射锥膜厚度不断减薄。在稳定雾化工况下, 旋流喷射锥膜厚度减薄至一定厚度时, 旋流喷射锥膜离心力与锥膜表面的收缩力相平衡, 旋流喷射锥膜直径就不再增大, 相应锥膜厚度就不再减薄, 此时, 在外部雾化力的作用下, (如: 旋流喷射流本身的脉动与不均匀性; 空间介质的阻力; 振动等因素), 使旋流喷射锥膜破碎, 形成碎膜, 在液体表面张力作用下形成细小分散的球形滴, 作分散流动, 达到雾化。

图 1 为压力旋流喷射雾化工况的分析示图。

喷咀出口断面上喷射液体的充满情况可用旋流喷咀断面的充满系数  $\phi$  表示。

$$\phi = 1 - \frac{f_B}{f_\sigma} = 1 - \frac{d_B^2}{d_c^2} \leq 1 \quad (1.1)$$

式中:

$d_c$  与  $f_c$  分别为旋流喷咀出口的直径 (单位: m) 和面积 (单位:  $\text{m}^2$ )

\* 钱伟长推荐。

$$f_c = \frac{\pi}{4} d_c^2$$

$d_B$  与  $f_B$  分别为旋流喷咀出口中心喷涡空腔的直径 (单位: m) 和面积 (单位:  $m^2$ )

$$f_B = \frac{\pi}{4} d_B^2$$

由此:

旋流喷射中心旋涡的空腔直径  $d_B$  (即旋流喷射内部自由表面的直径, 单位: m)

$$d_B = d_c \cdot \sqrt{1 - \phi} \quad (1.2)$$

旋流喷射的液膜厚度

$$\delta_c = \frac{d_c - d_B}{2} = d_c \cdot \frac{1 - \sqrt{1 - \phi}}{2} \quad (1.3)$$

旋流喷射液膜的平均直径

$$d_{cp} = \frac{d_c + d_B}{2} = d_c \cdot \frac{1 + \sqrt{1 - \phi}}{2} \quad (1.4)$$

喷咀断面的充满系数可由下式确定 (见图2):

$$\phi = f(A_c)$$

或<sup>(1)</sup>

$$A_c = \sqrt{\frac{1 - \phi}{\phi^3/2}} \quad (1.5)$$

式中:  $A_c$  为喷咀的旋流系数, 仅确定于旋流喷咀的结构特性。

旋流喷射锥膜与喷射轴线 (喷射方向的中心线) 称之为喷射角, 即为雾流喷射的喷雾角或雾化角, 用  $\theta$  表示。

喷射角是描述旋流喷射雾化的重要特性。关于旋流喷射角的理论研究, 至目前为止的著作中, 喷射角都根据旋流喷射的速度关系确定,  $\theta^* = \text{tg}^{-1} \omega_T / \omega_n$ 。例如: <俄>Г.Н.阿拉莫奇, <俄>В.И.斯柯柏尔金, <德>G.韦伯等, 都根据上述的速度关系导出相应的喷射角关系式 (见图3)。本文认为: 根据上述速度关系导出的旋流喷射的喷射角, 并不表示旋流喷射的喷射角, 而仅表示旋流喷射流的旋流角。于此提出: 旋流喷射的喷射角应根据工作液体作旋流喷射流动的作用力关系, 由旋流喷射的离心力和喷射方向的惯性力所产生的工作液体的压力来确定:  $\theta = \text{tg}^{-1} p_R / p_n$ 。由此可求导出的喷雾角计算式, 并将上述喷射角的计算结果同实验数据比较。结果表明: 本文导出的喷射角关系式同实验结果有较好的接近, 而且计算简单, 在实用上有一定的价值。

## 二、旋流喷射的流动方向

流体的流动取决于流体的压力关系。因此, 根据本文提出的压力旋流喷射雾化机理, 旋流喷射的流动方向就取决于旋流喷射的压力情况, 即: 旋流喷射角取决于旋流喷射的离心力和喷射方向的惯性力所产生的工作液体压力。

$$\theta = \text{tg}^{-1} \left( \frac{p_R}{p_n} \right) \quad (2.1)$$

式中  $p_R$  为旋流喷射离心力所产生的压力,

$p_n$  为喷射方向惯性力所产生的压力。

喷射角公式的求导如下:

假定 1: 工作液体在流动过程中, 在同一轴向流动断面上各点的旋流喷射轴向流运速度相等, 并可用轴向流动断面上的平均速度表示、因此, 在喷咀出口断面上旋流喷射的轴向喷射速度 (单位: m/s)

$$w_{c_{n\phi}} = w_{B_{n\phi}} = \frac{w_{c_n}}{\phi} \quad (2.2)$$

式中:  $w_{c_{n\phi}}$  和  $w_{B_{n\phi}}$  分别为喷咀出口断面上直径  $d_c$  和  $d_B$  处的旋流喷射的轴向喷射速度。

$w_{c_n}$  为整个喷咀断面上旋流喷射的平均轴向喷射速度

$$w_{c_n} = \frac{G}{3600 \cdot \gamma \cdot f_c} \quad (2.3)$$

$G$  为旋流喷咀的流量(kg/h);

$\gamma$  为工作液体的比重(kg/m<sup>3</sup>)。

假定 2: 旋流喷射流动中的工作液体满足动量矩守恒规律。由此, 在喷咀出口断面上旋流喷射流动:

$$w_T \cdot d = w_{c_T} \cdot d_c \quad (2.4)$$

式中:  $d$  为喷咀出口断面上旋流喷射流动的直径。

$w_T$  为喷咀出口断面上在直径  $d$  处的旋流喷射流动的切向速度。

$w_{c_T}$  为喷咀出口断面上在直径  $d_c$  处的旋流喷射流动的切向速度。

$$w_{c_T} = A_c \cdot w_{c_n} \quad (2.5)$$

设, 在喷咀出口断面上直径  $d$  处取一旋流喷射流的微团 (见图 4)。

微团的体积:

$$\Delta V = \Delta L \cdot \Delta S \cdot \Delta R \quad (2.6)$$

式中:  $\Delta L$  为微团的轴向长度,  $\Delta S$  为微团的圆周长度,  $\Delta R$  为微团的径向长度。

微团受力的作用情况, 按例下确定:

1. 微团上轴向喷射力所产生的轴向喷射压力

$$p_n = \frac{\Delta F_n}{\Delta f_n}$$

式中:

$\Delta F_n$  为作用在微团上的轴向喷射力

$$\Delta F_n = \frac{\gamma}{2g} \cdot w_{c_{n\phi}}^2 \cdot \Delta f_n$$

$g$  为重力加速度,

$\Delta f_n$  为微团的轴向面积,

$$\Delta f_n = \Delta S \cdot \Delta R$$

由此, 代入可得:

$$p_n = \frac{\gamma}{2g} w_{c_{n\phi}}^2 = \frac{\gamma}{2g} w_{c_n}^2 \cdot \frac{1}{\phi^2} \quad (2.7)$$

2. 作用在微团上切向力所产生的切向压力

$$p_T = \frac{\Delta F_T}{\Delta f_T}$$

式中:

$\Delta F_T$  为作用在微团上切向力

$$\Delta F_T = \frac{\gamma}{2g} w_T^2 \cdot \Delta f_T$$

$\Delta f_T$  为微团的周向面积

$$\Delta f_T = \Delta L \cdot \Delta R$$

由此, 代入可得:

$$p_T = \frac{\gamma}{2g} w_T^2 = \frac{\gamma}{2g} w_{cT}^2 \cdot \frac{d_c^2}{d^2} \quad (2.8)$$

3. 作用在微团上离心力所产生的径向压力

$$p_R = \frac{\Delta F_R}{\Delta f_R}$$

式中:

$\Delta F_R$  为作用在微团上的离心力

$$\Delta F_R = \frac{\gamma}{g} \cdot \Delta V \cdot \frac{w_T^2}{R} = \frac{\gamma}{g} w_T^2 \cdot \frac{\Delta R}{R} \cdot \Delta f_R$$

$\Delta f_R$  为微团的径向面积

$$\Delta f_R = \Delta L \cdot \Delta S$$

由此, 代入可得:

$$p_R = \frac{\gamma}{g} w_T^2 \cdot \frac{\Delta R}{R} \quad (2.9)$$

由此可知: 微团在上述三个力的作用下, 作螺旋锥线轨迹运动。工作液体在喷咀出口空间中形成一个中空渐扩的圆锥薄膜状流动。这一旋流喷射圆锥的喷射角, 可根据旋流喷射的离心力和喷射的惯性力所产生的压力来确定:  $\theta = \text{tg}^{-1} p_R / p_n$ , 将上述关系式代入, 可得:

$$\theta = \text{tg}^{-1} 2 \cdot \frac{\Delta R}{R} \left( \frac{w_T}{w_{cn\phi}} \right)^2$$

或

$$\theta = \text{tg}^{-1} 2\phi^2 \cdot A_c^2 \cdot \frac{R_c^2 \cdot \Delta R}{R^3} \quad (2.10)$$

上述关系式表明:

1. 在喷咀出口断面上处于不同直径处的液体微团, 它的喷射方向是不同的。喷射角随所处直径的增大而减小。

2. 在喷咀出口断面上处于壁面处  $d_c$  的微团, 它的喷射角  $\theta_c$  为最小

$$\theta_c = \text{tg}^{-1} 2\phi^2 \cdot A_c^2 \cdot \frac{\Delta R}{R_c} \quad (2.11)$$

3. 在喷咀出口断面上处于近中心自由表面处  $d_B$  直径的微团, 它的喷射角  $\theta_B$  为最大

$$\theta_B = \text{tg}^{-1} 2\phi^2 \cdot A_c^2 \cdot \frac{1}{(1-\phi)^{3/2}} \cdot \frac{\Delta R}{R_c} \quad (2.12)$$

### 三、喷雾角关系式的确定

1. 按旋流喷射液体在喷咀出口断面上所受的平均压力确定的喷雾角。用  $\theta_s$  表示:

$$\theta_3 = \text{tg}^{-1} \left( \frac{p_{Rf}}{p_{nf}} \right) \quad (3.1)$$

式中:  $p_{nf}$  为轴向喷射压力;  $p_{Rf}$  为径向离心压力。

轴向喷射压力

$$p_{nf} = \frac{F_{nf}}{f_n}$$

式中:  $F_{nf}$  为轴向喷射力

$$F_{nf} = \int \Delta F_n = \frac{\gamma}{2g} \cdot w_{c_n\phi}^2 \cdot \int \Delta f_n$$

$f_n$  为轴向面积

$$f_n = \int \Delta f_n = \phi \cdot f_G$$

由此代入可得:

$$p_{nf} = \frac{\gamma}{2g} \cdot w_{c_n\phi}^2 = p_n \quad (3.2)$$

径向离心压力

$$p_{Rf} = \frac{F_{Rf}}{f_R}$$

式中:  $F_{Rf}$  为径向离心力

$$\begin{aligned} F_{Rf} &= \int \Delta F_R = \int \frac{\gamma}{g} \cdot w_T^2 \cdot \frac{\Delta R}{R} \cdot \Delta L \cdot \Delta S \\ &= \int \frac{\gamma}{g} \cdot w_{c_T}^2 \cdot \frac{R_c^2}{R^3} \cdot \Delta R \cdot \Delta L \cdot \Delta S \\ &= \frac{\gamma}{g} \cdot w_{c_T}^2 \cdot R_c^2 \cdot \left[ \frac{1}{2R_B^2} - \frac{1}{2R_c^2} \right] \cdot \int \Delta L \cdot \Delta S \\ &= \frac{\gamma}{2g} \cdot w_{c_T}^2 \cdot \frac{\phi}{1-\phi} \cdot \int \Delta f_R \end{aligned}$$

$f_R$ ——径向面积

$$f_R = \int \Delta f_R$$

由此代入可得:

$$p_{Rf} = \frac{\gamma}{2g} \cdot w_{c_T}^2 \cdot \frac{\phi}{1-\phi} \quad (3.3)$$

将式(3.2)、(3.3)代入式(3.1)可得:

$$\theta_3 = \text{tg}^{-1} \frac{\phi^3}{1-\phi} \cdot A_c^2$$

把式(1.5)代入:

$$\theta_3 = \text{tg}^{-1} 2(1-\phi) \quad (3.4)$$

2. 按旋流喷射液体在喷咀出口断面上平均直径  $d_o$  处的作用压力确定的喷雾角用  $\theta_4$  表示:

$$\theta_4 = \text{tg}^{-1} \cdot \left( \frac{p_{Rd}}{p_{nd}} \right) \quad (3.5)$$

式中:

$p_{nd}$  为喷嘴断面上平均直径  $d_{c\tau}$  处旋流喷射液体的轴向喷射压力;

$p_{Rd}$  为喷嘴断面上平均直径  $d_{c\tau}$  处旋流喷射液体的径向离心压力

喷嘴断面上  $d_{c\tau}$  处旋流喷射液体的轴向喷射压力:

$$p_{nd} = \frac{F_{nd}}{f_{nd}}$$

根据式(2.7)可得:

$$p_{nd} = p_n = \frac{\gamma}{2g} \cdot \omega_{c\tau}^2 r \phi \quad (3.6)$$

喷嘴断面上  $d_{c\tau}$  处旋流喷射液体的径向离心压力:

$$p_{Rd} = \frac{F_{Rd}}{f_{Rd}}$$

式中:

$F_{Rd}$  为  $d_{c\tau}$  处旋流喷射液体的径向离心力

$$F_{Rd} = [\Delta F_R]_{c\tau} = \left[ \frac{\gamma}{g} \Delta V \cdot \frac{\omega_{c\tau}^2}{R} \right]_{c\tau} = \frac{\gamma}{g} \cdot \frac{\omega_{c\tau}^2 r \phi}{R_{c\tau}} \cdot \phi \pi R_c^2 \cdot \Delta l$$

$f_{Rd}$  为  $d_{c\tau}$  处旋流喷射液体的径向面积

$$f_{Rd} = 2\pi R_{c\tau} \cdot \Delta l$$

由此代入可得:

$$p_{Rd} = \frac{\gamma}{2g} \cdot \phi \cdot \omega_{c\tau}^2 r \cdot \left( \frac{R_c}{R_{c\tau}} \right)^2$$

根据假定 2.  $\omega_{c\tau} \cdot R_{c\tau} = \omega_{cT} \cdot R_c$ . 关系代入

$$p_{Rd} = \frac{\gamma}{2g} \cdot \phi \cdot \omega_{cT}^2 \cdot \left( \frac{R_c}{R_{c\tau}} \right)^4$$

由式(1.4)代入可得:

$$p_{Rd} = \frac{\gamma}{2g} \omega_{cT}^2 \cdot \phi \cdot \left( 1 + \sqrt{1 - \phi} \right)^2 \quad (3.7)$$

将式(3.6)、(3.7)代入式(3.5)

$$\theta_4 = \text{tg}^{-1} A_c^2 \cdot \phi^3 \cdot \left( 1 + \sqrt{1 - \phi} \right)^4$$

把式(1.5)代入

$$\theta_4 = \text{tg}^{-1} \frac{32(1-\phi)^2}{(1 + \sqrt{1-\phi})^4} \quad (3.8)$$

上式亦可写成下列表达式:

$$\theta_4 = \text{tg}^{-1} 2(1-\phi)^2 \cdot \left( \frac{d_c}{d_{c\tau}} \right)^4 = \text{tg}^{-1} 2 \cdot \left( \frac{d_B}{d_{c\tau}} \right)^4 \quad (3.9)$$

3. 由于实际液体的粘性和表面张力等影响, 实际液体的旋流喷射的喷雾角较上述理论计算结果要小, 现提出如下的喷雾角修正式:

$$\theta_5 = \text{tg}^{-1} 1.78(1-\phi) \quad (3.10)$$

#### 四、实验验证

现有著作中, 根据旋流喷射的速度关系  $\theta^* = \text{tg}^{-1} \left( \frac{\omega_{cT}}{\omega_n} \right)$  所导出的喷雾角关系式:

1. <俄>Г.Н. 阿拉莫维奇、<德>G. 韦伯等提出的:

$$\theta_1 = \text{tg}^{-1} \frac{(1-\phi)\sqrt{8}}{(1+\sqrt{1-\phi})\sqrt{\phi}} \quad (4.1)$$

2. <俄>В. И. 斯柯柏尔金、<英>E. 季文等提出的:

$$\theta_2 = \text{tg}^{-1} \frac{2\mu_M \cdot A_c}{\sqrt{(1+\sqrt{1-\phi})^2 - 4\mu_M^2 A_c^2}} \quad (4.2)$$

式中:  $\mu_M$  为理想旋流喷射流动情况下, 旋流喷咀的流量系数

$$\mu_M = \sqrt{\frac{\phi^3}{2-\phi}} \quad (4.3)$$

本文根据旋流速度的作用力关系  $\theta = \text{tg}^{-1}\left(\frac{D_R}{D_n}\right)$  所导出的喷雾角关系式:

3. 按喷咀断面上旋流喷射液体的平均作用压力关系确定的喷雾角关系式:

$$\theta_3 = \text{tg}^{-1} 2(1-\phi) \quad (3.4)$$

4. 按喷咀断面上旋流喷射液体在平均直径处的作用压力关系确定的喷雾角关系式:

$$\theta_4 = \text{tg}^{-1} \frac{32(1-\phi)^2}{(1+\sqrt{1-\phi})^4} \quad (3.8)$$

5. 考虑液体粘性和表面张力的影响, 提出修正的喷雾角关系式:

$$\theta_5 = \text{tg}^{-1} 1.78(1-\phi) \quad (3.10)$$

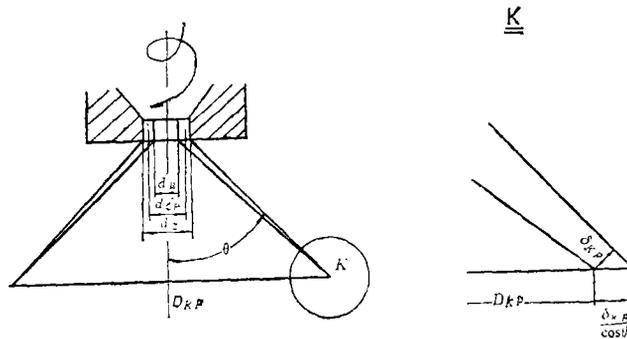


图1 压力旋流喷射雾化工况的分析示图

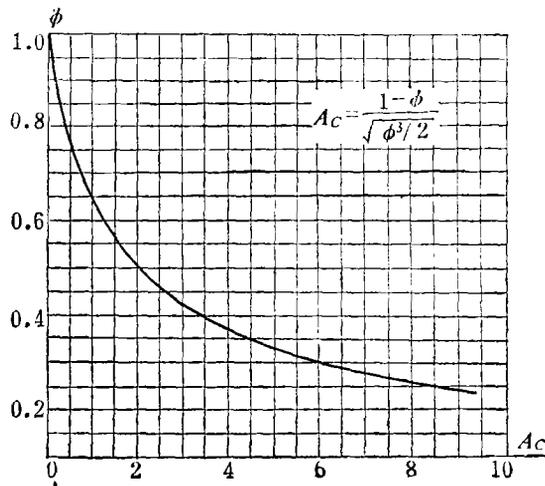


图2 旋流喷射喷咀断面的充满系数

上述喷雾角关系式的计算结果同实验数据进行比较，列述于表 1 和图 5 中。其中： $\theta_0$  为喷雾角的实验数据。

由上述比较可知：本文所提出的按旋流喷射的作用力关系所确定的喷雾角关系式，同实验数据有较好的接近。而且计算简单。



图 3 喷射角的确定

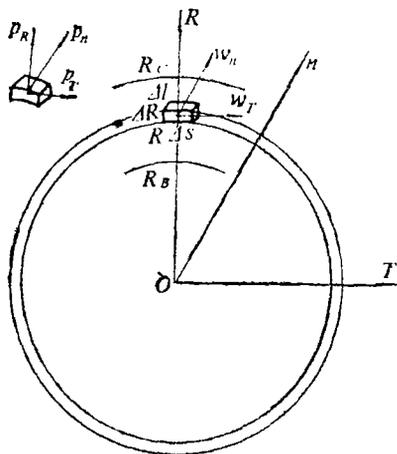


图 4 作用在微团上的力

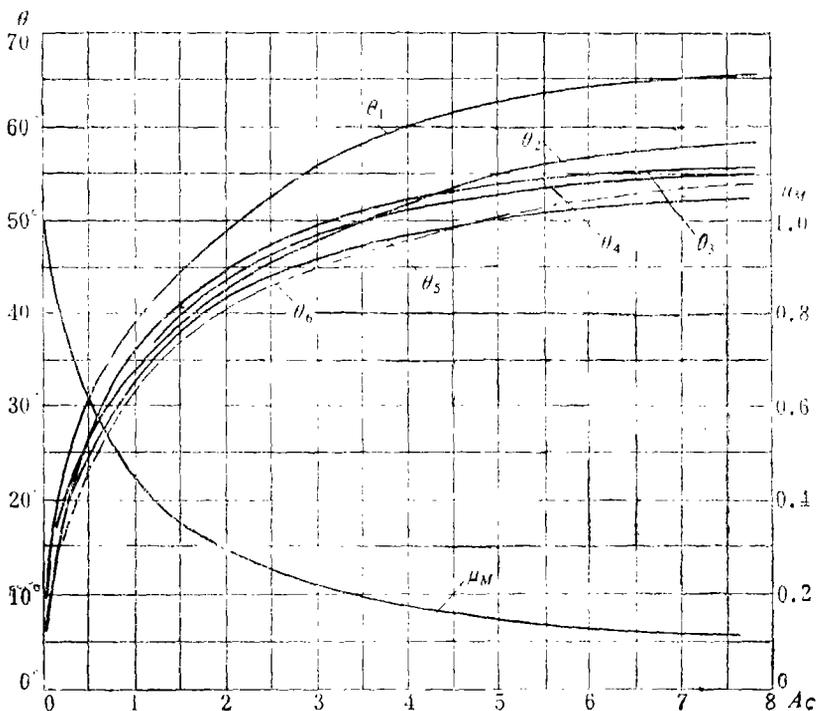


图 5 根据各种公式计算的喷射角特性同实验数据的比较

表 1 各种旋流喷雾角理论计算式与实验数据比较

$\phi$	$A$	$\mu\text{M}$	$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_3$	$\theta_4$	$\theta_5$	$\theta_6$
0.24	9.12	0.089	67.0	60.2	56.7	56.5	53.5	56.0
0.28	6.86	0.113	65.0	57.5	55.2	54.9	52.0	54.0
0.32	5.31	0.140	63.0	55.4	53.7	53.4	50.4	51.2
0.36	4.20	0.168	60.6	52.5	52.0	51.4	48.7	48.0
0.40	3.35	0.200	57.5	49.0	50.2	49.1	46.7	45.6
0.42	3.01	0.217	55.2	47.8	49.3	48.3	45.9	44.5
0.44	2.71	0.234	53.6	46.2	48.3	47.2	44.8	43.5
0.46	2.45	0.252	52.0	45.0	47.2	46.1	43.8	42.4
0.48	2.21	0.269	50.5	43.8	46.2	44.8	42.8	41.4
0.50	2.00	0.284	49.0	43.0	45.0	43.5	41.7	40.3
0.52	1.82	0.308	47.2	41.0	43.8	42.0	40.5	39.0
0.54	1.64	0.329	45.6	40.0	42.6	40.8	39.3	37.8
0.56	1.48	0.350	44.4	39.0	41.4	39.2	38.0	36.4
0.58	1.35	0.370	43.0	37.5	40.0	37.5	36.7	35.6
0.60	1.22	0.393	41.8	36.0	38.6	35.9	35.4	34.0
0.62	1.10	0.415	40.9	35.0	37.1	34.2	34.0	32.6
0.64	1.00	0.438	40.0	34.0	35.8	32.4	32.6	31.4
0.66	0.90	0.464	38.5	33.0	34.2	30.5	31.0	29.4
0.68	0.81	0.487	37.0	31.0	32.6	28.5	29.6	27.6
0.70	0.725	0.514	35.4	30.0	31.0	26.8	28.2	26.6
0.72	0.65	0.540	34.2	28.6	29.2	24.8	27.0	24.5
0.74	0.578	0.567	33.4	27.6	27.5	22.7	24.8	23.0
0.75	0.544	0.580	32.6	26.4	26.6	21.7	23.9	22.6
0.76	0.512	0.595	31.8	24.8	25.0	20.6	23.1	22.0
0.78	0.45	0.624	30.4	24.6	23.7	18.5	21.3	20.0
0.80	0.395	0.653	29.0	24.0	21.8	16.4	19.6	18.0
0.82	0.343	0.683	25.0	22.7	19.8	14.1	17.8	17.0
0.85	0.271	0.732	22.0	20.6	16.7	11.1	15.0	16.0
0.88	0.205	0.780	20.0	19.0	13.5	8.0	12.0	13.0
0.90	0.166	0.815	18.0	17.5	11.3	6.13	10.1	10.0
0.95	0.076	0.904	14.5	14.0	6.0	4.1	5.2	5.8
1.00	0.0	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

参 考 文 献

- [ 1 ] 鲁定远, 压力旋流喷雾理论与喷雾粒度特性的探讨, 上海纺织工业设计院 (1979).
- [ 2 ] 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).
- [ 3 ] 电厂燃油设计编写组, 《电厂燃油设计》, 湖北省电力设计院 (1975).
- [ 4 ] Giffen, E. and A. Maraszyn, *The Atomisation of Liquid Fuels* (1953).
- [ 5 ] Weber, G., *Öldruck-Zerstäuber-Brenner für Dampfkessel feiner ungen mittlerer and großer Leistung, VGB H106* (1967), 1.
- [ 6 ] 岩下惣吉 (日本), 重油心一ナの燃烧特性し= 及はず各因子の影響, 火力发电, 18, 3 (1967), 29.
- [ 7 ] 热管理便览编写组 (日本), 《热管理便览——燃烧器》(昭和38年).
- [ 8 ] Прохов А. М., О Новом направлении в теории центробежных форсунок, *Теплоэнергетика*, 2 (1963), 26—30.
- [ 9 ] Морошкин М. Я., Расчет угла факела и толщины пленки на выходе из центробе-

жных форсунок, *Теплоэнергетика*, 9 (1969), 88.

- [10] Морозкин М. Я., Расчет центробежных форсунок, *Энергетическое Машиностроение*, 3 (1966).

## Study on the Characteristic of the Spray Angle in Pressure Swirl Spray Atomisation

Lu Ding-yuan

(*Shanghai Textile Industry Design Institute, Shanghai*)

### Abstract

Based on the suggested atomisation theory for the swirl spray conical film, the formula for the spray angle characteristic of pressure swirl spray atomisation is derived from the relation of acting forces in swirl spray.

The spray angle characteristics of swirl spray are worked out with various formulas and are compared with actual test data. The results show that the derived formulas for spray angle in this article agree comparatively well with the results from experiments, and that the expressions are simple. They are of definite value in practice.