

# 牛顿型黏性物料转盘离心雾化成粒特性

## Particle characteristics of centrifugal atomization by rotary disk for Newtonian viscous fluid

王东祥<sup>1,2</sup> 崔政伟<sup>1,2</sup> 俞建峰<sup>1,2</sup> 杨新俊<sup>1,2</sup>

WANG Dong-xiang<sup>1,2</sup> CUI Zheng-wei<sup>1,2</sup> YU Jian-feng<sup>1,2</sup> YANG Xin-jun<sup>1,2</sup>

(1. 江南大学机械工程学院, 江苏 无锡 214122; 2. 江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 江苏 无锡 214122)

(1. College of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China;

2. Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment & Technology, Wuxi, Jiangsu 214122, China)

**摘要:**针对转盘离心雾化器,研究松香—石蜡混合物的成粒特性,分析工艺参数对纤维数量、纤维直径、界面波波长和颗粒粒径的作用机理,建立无量纲预测模型。结果表明:纤维数量由韦伯数与稳定数决定,低黏度物料的纤维数量主要受表面张力影响。因离心拉伸,纤维断裂的界面波波长为纤维直径的3.56倍,但其断裂仍为短波模式。完全纤维状成粒的纤维数量维持不变且与流量无关,流量的增加主要通过纤维直径和长度的延伸来体现。颗粒粒径主要由纤维直径和界面波波长决定,高转速时液膜与转盘间切向速度滑移增大,颗粒粒径不再明显减小,可以采用如增大转盘直径或者改善转盘表面拓扑结构等途径调控颗粒粒径,而非无限加大转盘转速。

**关键词:**离心雾化;转盘;成粒特性;黏性流体;VOF模型

**Abstract:** For rotary disk atomizer in this paper, the particle characteristics has been investigated with Rosin/Paraffin mixture as the working fluid. The effects of different technological parameters on the ligament number, diameter of ligament, capillary wavelength and particle diameter were analyzed, and the dimensionless prediction model was obtained. The result showed that the ligament number is mainly determined by the We and the St number, and it is only controlled by the surface tension for low viscous fluids. Due to ligament stretching caused by centrifugal effect, the pinch-off capillary wavelength is about 3.56 times of the ligament diameters, however the actual dominant mode is the short-wave mode. For the fully-ligament mode, the ligament number will remain unchanged with the increasing of pouring flow, while the diameter and length will grow. The diameter of particles is mainly determined by the ligament number and capillary wavelength. The higher the rotational speed is, the

larger the tangential slip ratio is, the diameter of particles will not obviously reduce consequently. It is suggested to control the diameter of particles by a disk with a large diameter or improvement of the topological structure of the disk rather than by the method of always increasing the rotational speed.

**Keywords:** centrifugal atomization; rotary disk; particle characteristics; Newtonian viscous fluid; VOF model

离心雾化利用机械旋转形成离心力将物料液流破碎为液滴,进入气相冷却凝固,可显著改善气—液或气—固相间的接触与混合,强化热质传递,缩短操作时间,广泛应用于食品和材料行业热敏性物料的粉体制备<sup>[1]</sup>及快速干燥<sup>[2-3]</sup>等领域。相比其它离心雾化器,普通转盘完全能达到相同雾化效果,且惯性力更低、节能、稳定性更高,应用相对广泛<sup>[4-5]</sup>。当浇注至转盘时,物料因离心作用向外延伸并在转盘表面沿径向形成连续分布的液膜,液膜运动至转盘边缘失稳破碎并最终形成液滴,其成粒特性是决定雾化颗粒尺寸、形态并进而作用于其冷却速率与最终产物品质的关键因素<sup>[6-7]</sup>。

薄液膜在转盘边缘可呈滴状、纤维状或者膜状成粒,具体成粒模式与转盘直径、转速以及物料物性等相关,不同模式间可相互转变<sup>[8]</sup>。相比滴状与膜状,完全纤维状成粒的生产能力较大,颗粒尺寸相对均匀且形态规整,是雾化工艺的最佳选择<sup>[4-5,7]</sup>。完全纤维状成粒时,液膜在转盘边缘因气—液相界面 Rayleigh-Taylor<sup>[9]</sup>失稳形成若干纤维状液柱,纤维因表面张力影响而产生沿纤维传播的界面波,引起纤维紧缩断裂成液滴<sup>[7]</sup>。很多学者<sup>[7,10-14]</sup>针对液膜的破碎行为开展了研究,然而尚未实现纤维数量的准确预测,且雾化过程无凝固行为。Shinjo等<sup>[15]</sup>针对微重力条件下圆管受限射流雾化的研究指出,受流动状态影响,纤维可呈长波或者短波2种断裂模式。长波模式(Rayleigh模式<sup>[16-17]</sup>)界面波波长 $\lambda$ 与纤维直径 $d_L$ 之间满足 $\lambda = 4.50d_L$ ,而短波模式 $\lambda =$

基金项目:国家自然科学基金(编号:51606086)

作者简介:王东祥(1985—),男,江南大学副教授,博士。

E-mail: dxwang@jiangnan.edn.cn

收稿日期:2018-05-20

$\pi d_L / \sqrt{3}$ 。目前学者<sup>[15,18-20]</sup>开展的有关纤维断裂行为的研究集中于射流领域,由于喷嘴本身就增加了液流的扰动程度,影响纤维断裂行为,而在转盘离心雾化中,纤维处于离心力场中,其断裂原理是否与上述研究有所不同,这些目前还鲜有涉及。

本试验拟以转盘离心雾化器为研究对象,松香-石蜡混合物为原料,结合试验研究与数值分析,针对不同雾化工艺参数的成粒特性开展研究,分析纤维数量、直径,界面波波长和颗粒粒径的作用机理,实现纤维直径、界面波波长和颗粒粒径的准确预测,进一步揭示成粒特性的演变规律,为转盘离心雾化系统设计与优化提供可借鉴的理论与应用基础。

## 1 材料与方 法

### 1.1 材 料

为便于粒径分析,所选物料在常温下应可凝固,综合考虑后,选择松香-石蜡混合物作为试验介质,控制松香和石蜡质量比为4:1,表1为所选物料物性参数。

表1 松香-石蜡混合物物性参数

Table 1 Physical properties of Rosin/Paraffin mixture

温度 $T/$ $^{\circ}\text{C}$	密度 $\rho/$ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	黏度 $\mu/$ $(\text{Pa} \cdot \text{s})$	表面张力 $\sigma/$ $(\text{N} \cdot \text{m})$
110 (RP1)	961.1	0.119	0.042 4
130 (RP2)	927.8	0.050	0.039 7

### 1.2 仪 器 与 设 备

超声流量计:FLEXIM G601型,英国帕尔希森有限公司;

高速摄像机:Phantom Miro R320S型,美国 Vision Research公司;

电子天平:C-144型,上海友声衡器有限公司。

### 1.3 方 法

1.3.1 试验方法 给定转盘结构和物料,调整转速 $\omega$ 与介质流量 $Q$ 开展试验,如图1所示,试验物料由浇注管流至转盘轴心,管口距转盘上表面10 mm。转盘材料304不锈钢,直径 $D$ 分别为50,100 mm,表面抛光,粗糙度 $Ra=1.60 \mu\text{m}$ 。试验物料流量0~25 mL/s,转速62.8~188.5 rad/s。按质量比4:1配置松香-石蜡混合物,以填满坩埚为宜,试验物料由电磁加热熔化至指定温度,经控制阀调节流量后浇注。单次试验完毕,收集样品,称重,以标准筛网筛分,以颗粒平均直径 $d_m$ 、颗粒尺寸分布作为衡量指标评价成粒效果,颗粒平均直径可按式(1)计算:

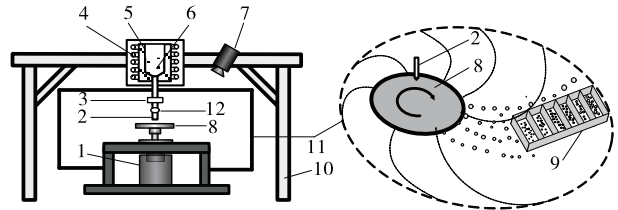
$$d_m = \sum_i^n d_i \zeta_i, \quad (1)$$

式中:

$d_m$ ——颗粒平均直径,mm;

$d_i$ ——某规格筛网筛分所得颗粒的平均尺寸,mm;

$\zeta_i$ ——某规格筛网筛分所得颗粒的质量分数,%。



1. 电机 2. 浇注管 3. 阀门 4. 电磁加热器 5. 坩埚 6. 松香-石蜡 7. 高速摄像机 8. 转盘 9. 样品收集 10. 支座 11. 粒化室 12. 流量计

图1 试验装置

Figure 1 Schematic diagram of experimental apparatus

1.3.2 颗粒粒径预测模型 相比滴状与膜状,完全纤维状成粒是最理想的雾化模式,本试验均在该模式下进行。图2所示为转盘离心雾化纤维状成粒原理,包含转盘表面薄膜流形成、薄膜流纤维化以及纤维断裂形成液滴3个过程。

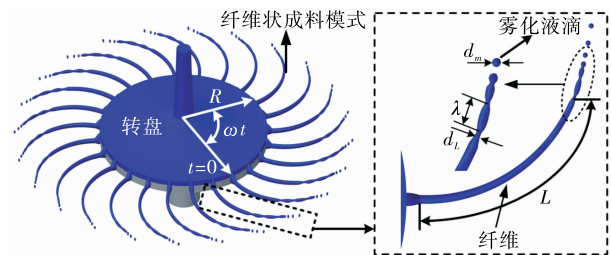


图2 转盘离心雾化成粒原理

Figure 2 Schematic diagram of droplet generating by rotary disk atomization

随着纤维向外延伸,纤维逐渐变细并因表面张力作用发生颈缩而断裂。对于给定转速,完全纤维状成粒时,纤维数量不随物料体积流量变化而为一定值,颗粒尺寸 $d_m$ 则可通过颈缩断裂时的界面波波长 $\lambda$ 与纤维直径 $d_L$ 来估计<sup>[10]</sup>。若假设单个波长内的纤维直径为常量,且忽略断裂时形成的少量卫星液滴的影响,颗粒平均粒径 $d_m$ 可以通过式(2)计算:

$$\frac{4}{3} \pi \left(\frac{d_m}{2}\right)^3 = \pi \left(\frac{d_L}{2}\right)^2 \lambda. \quad (2)$$

对于不可压缩流体,纤维直径 $d_L$ 可通过物料流量 $Q$ ,纤维数量 $K_L$ 以及纤维长度 $L$ 确定。假设纤维的运动轨迹可以近似为以转盘直径为圆的渐开线,则纤维流体速度可以表示为 $v_L = \sqrt{2R\omega^2 L}$ 。根据体积流量守恒,纤维直径可以表示为 $d_L = \sqrt{4Q/\pi K_L v_L}$  ( $K_L$ 为纤维数量,可通过试验获得),Weber<sup>[16]</sup>针对圆管射流纤维断裂过程的研究表明,纤维长度与纤维直径间存在 $L/d_L: \sqrt{\rho d_L v_L^2 / \sigma}$ 。综合考虑,经变换后纤维直径 $d_L$ 可以采用式(3)表征:

$$\frac{d_L}{R} = CK_L^{-\frac{2}{7}} \left(\frac{\sigma}{\rho \omega^2 R^3}\right)^{\frac{2}{7}} \left(\frac{\rho Q^2}{\sigma R^3}\right)^{\frac{1}{7}}, \quad (3)$$

式中:

$C$ ——待定常数;

$K_L$ ——纤维数量,可以通过 $We$ 和 $St$ 表征。

若定义无量纲体积流量 $Q_R = \rho Q^2 / \sigma R^3$ ,则式(3)可进一步简化为:

$$\frac{d_L}{R} = C' We^a St^b Q_R^c, \quad (4)$$

式中:

$We$ ——韦伯数,  $We = \rho\omega^2 R^3 / \sigma$ ;

$St$ ——稳定数,  $St = \mu^2 / \rho R \sigma$ ;

$R$ ——转盘半径, m;

$Q$ ——物料流量, mL/s;

$\rho$ ——物料密度, kg/m<sup>3</sup>;

$\mu$ ——物料运动黏度, Pa·s;

$\sigma$ ——表面张力, N·m。

结合式(2)、(4), 颗粒平均粒径  $d_m$  的预测模型为:

$$\frac{d_m}{R} = \sqrt[3]{\frac{3}{2}\lambda d_L^2} = \sqrt[3]{\frac{3}{2}\lambda C We^{a1} St^{b1} Q_R^{c1}}. \quad (5)$$

纤维断裂时的界面波波长  $\lambda$  与纤维直径  $d_L$  很难通过试验测量, 且理论上难以计算, 本研究拟通过计算流体动力学分析求得, 结合试验获得的纤维数量  $K_L$  与统计分析获得的颗粒平均粒径  $d_m$ , 即可建立颗粒尺寸预测模型。

1.3.3 数值方法 VOF 方法可以表征复杂相界面的结构与演变, 相界面锐利程度较高。相比其它相界面追踪方法, 在描述复杂相界面和处理三维相界面的融合与破碎问题时具有潜在的优势, 本试验将采用 FLUENT.15.0 平台集成的 VOF 模型表征转盘边缘液膜的纤维化特性, 获得纤维断裂时的界面波波长  $\lambda$  与纤维直径  $d_L$  等参数。做如下假设: ① 物料相流量恒定, 呈连续、均匀流动, 转盘附近的空气相流动行为仅受转盘以及物料影响; ② 转盘表面液膜的流动行为可假设为旋转周期性流动; ③ 计算区域仅包括转盘边缘以及附近空气相区域; ④ 物料在转盘表面温度变化非常小, 忽略物料与转盘之间的热量传递。图 3、4 为简化的三维物理模型、边界条件示意图以及网格划分图。转盘表面液膜的流动特性作为边界条件加入计算模型, 包括液膜厚度、径向速度以及切向速度滑移, 可根据笔者前期研究<sup>[7]</sup>计算。模型周向仅包括弧度为  $\theta$  的区域,  $\theta$  角的选取应保证计算区域内至少形成 2 根纤维, 需通过大量计算尝试以最终确定  $\theta$  值范围。

模型进口采用速度入口边界 (Velocity inlet), 物料体积分数为 1, 给定入口处物料径向速度以及切向速度滑移量。出口区域流体充分发展, 设定为自由出口 (Pressure outlet),

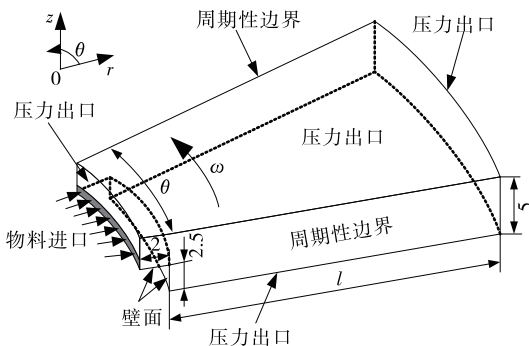


图 3 数值模型与边界条件示意图

Figure 3 Schematic of computational domain with relevant boundary conditions

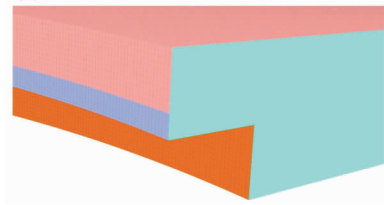


图 4 模型网格局部放大图

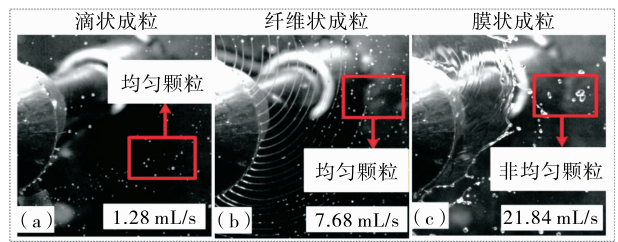
Figure 4 Typical mesh of the computational domain

2 个周向界面为旋转周期性边界 (Periodicity), 转盘表面以及侧面为无滑移边界条件。

## 2 结果与分析

### 2.1 成粒模式

由图 5(a) 可知, 当  $Q = 1.28$  mL/s 时, 液膜在转盘边缘直接破碎形成液滴并凝固, 呈滴状成粒模式, 颗粒形态和尺寸相对均匀。当  $Q$  增至 7.68 mL/s 时, 滴状过渡至完全纤维状成粒模式, 液滴均因纤维紧缩断裂而成 [图 5(b)], 纤维数量达到最多且不随流量改变, 成粒过程趋于准稳定, 颗粒较为均匀且粒径分布窄。当  $Q$  增至 21.84 mL/s 时, 纤维融合, 呈膜状成粒模式, 颗粒主要有 2 种生成模式, 一是由液膜直接破碎而成; 二是液膜可一次破碎形成纤维, 纤维二次破碎形成颗粒 [图 5(c)]。相比滴状与纤维状, 膜状成粒时, 颗粒形态和尺寸均较为不均匀。对于给定操作条件, 应严格控制物料流量, 确保成粒模式集中于完全纤维状模式。图 6 为纤维状成粒模式数值模拟与试验对比图。虽然数值模拟与试验转速方向相反, 但在相同操作条件下, 数值计算结果与试验吻合较好, 纤维运行轨迹一致, 纤维数量分别为 46 与 45, 基本一致, 根据数值计算结果可以获得界面波波长、纤维直径等有效信息。



(a) 滴状成粒 (b) 纤维状成粒 (c) 膜状成粒

$D = 50$  mm,  $\omega = 94.3$  rad/s

图 5 不同成粒模式演化过程

Figure 5 Breakup mode of liquid film

### 2.2 纤维数量

图 7 为转盘直径分别为 0.05、0.10 m 时, 纤维数量与转盘转速的关系曲线。对于  $D = 0.05$  m 的转盘, 随着转速由 62.8 rad/s 增加至 188.5 rad/s, RP1 物料的液柱数量由 31 增加至 78, RP2 的液柱数量则由 37 增加至 84。对于  $D = 0.10$  m 的转盘, RP1 物料的液柱数量由 82 增加至 188, RP2 的液柱数量则由 94 增加至 206。相同转盘和转速条件下, 2 种物料的纤维数量差别并不是太大, 以 0.05 m 的转盘以及转速 188.5 rad/s 为例, RP2 的纤维数量较 RP1 仅高出

7.1%。虽然2种工质的黏度相差很大,但表面张力非常接近(表1),可以推知,在黏度范围内(0.050~0.119 Pa·s),纤维数量主要受表面张力影响,而黏性力的影响则要小得多。因此,在相同转盘结构与转速条件时,较低黏度物料转盘离心雾化的纤维数量可以只考虑表面张力的影响,而黏度的影响可以忽略。如图8所示,经线性回归,液柱数量与 $We$ 以及

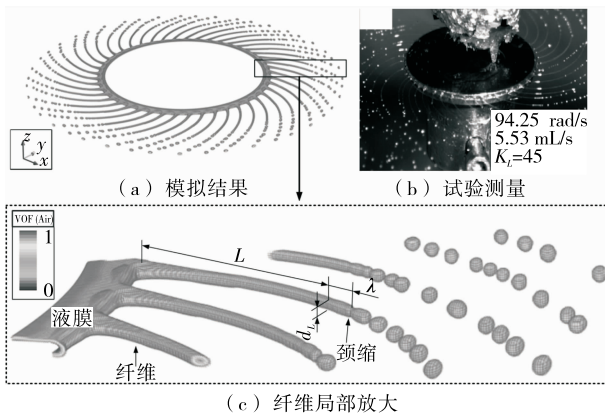


图6 纤维状成粒数值模拟与试验对比

Figure 6 Ligament mode atomization mechanism by numerical modeling at  $t=62.43$  ms

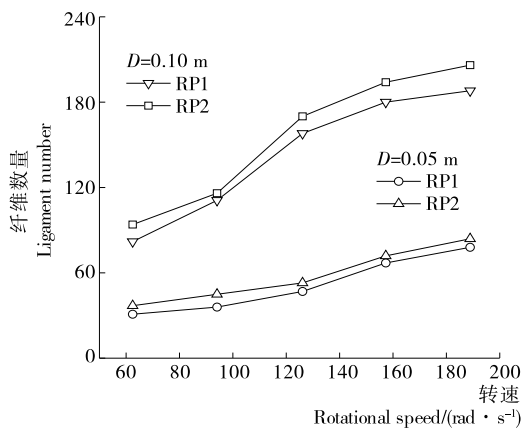


图7 液柱数量与转速的关系曲线

Figure 7 Number of ligaments with increasing rotational speed

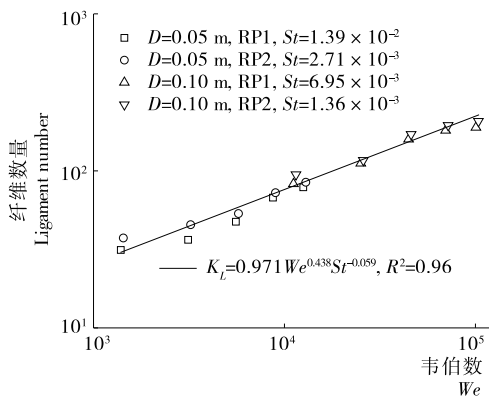


图8 纤维数量与 $We$ 的关系曲线

Figure 8 Relation between number of ligaments and Weber number

$St$  的关系可以表示为式(6),回归系数  $R^2=0.96$ ,各参数适用范围分别为  $We = 1.40 \times 10^3 \sim 1.04 \times 10^5$ ,  $St = 1.38 \times 10^{-3} \sim 1.39 \times 10^{-2}$ 。

$$K_L = 0.971 We^{0.438} St^{-0.059} \quad (6)$$

2.3 纤维直径

由图9可以看出,转速的升高显著降低了纤维直径,相同转速条件下,物料黏度较高时,纤维直径也较大。对于  $D=0.05$  m 的转盘,当转速由62.8 rad/s 增加至188.5 rad/s,RP1 的纤维直径由0.619 缩小至0.352 mm,RP2 则由0.563 缩小至0.328 mm,而对于  $D=0.10$  m 的转盘,2种物料的尖端直径则分别由0.385 缩小至0.272 mm 以及0.293 缩小至0.230 mm。在较大转盘直径或较高转速条件下时,转盘边缘形成更多纤维,纤维直径也相应减小。

图10为转速125.7 rad/s 时液纤维直径与物料体流量的关系曲线。纤维直径随着物料流量的增加而呈缓慢上升趋势,并没有引起纤维直径显著增大。对于  $D=0.05$  m 的转盘,随着流量由4 mL/s 增大至7 mL/s,RP1 纤维直径由0.389 mm 升至0.392 mm,RP2 也仅由0.352 mm 上升至0.354 mm,对于  $D=0.10$  m 的转盘也有同样结论。完全纤维状成粒模式时,由于纤维数量维持不变,因此物料流量的增加主要通过纤维长度的延伸来体现,而不会引起纤维直径

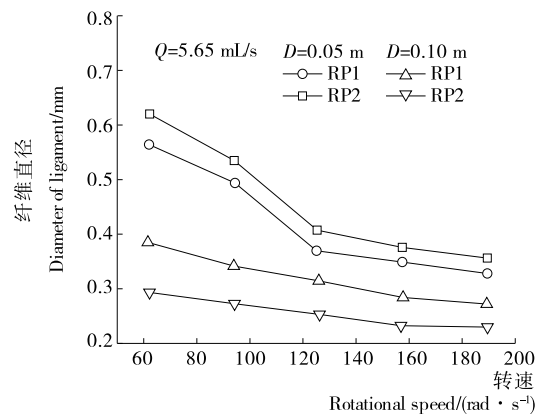


图9 纤维直径与转速的关系曲线

Figure 9 Diameter of ligaments with increasing rotary speed

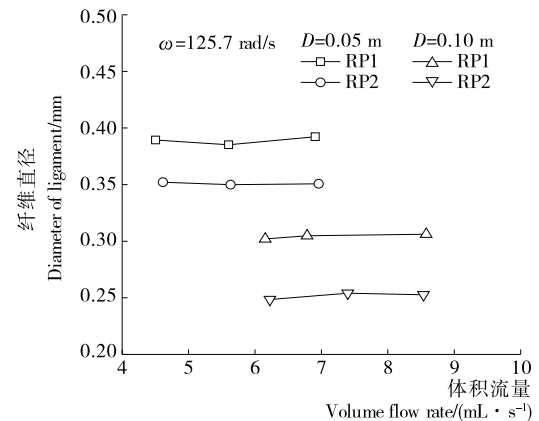


图10 纤维直径与流量的关系曲线

Figure 10 Diameter of ligaments with increasing liquid flow rate

显著改变,但物料物性对于纤维直径有较大影响。结合式(4),经线性回归,纤维直径  $d_L$  可通过式(7)预测,回归系数  $R^2=0.93$ ,各参数适用范围分别为  $We=1.40 \times 10^3 \sim 1.04 \times 10^5$ ,  $St=1.38 \times 10^{-3} \sim 1.39 \times 10^{-2}$ 。

$$\frac{d_L}{R} = 0.268We^{-0.056} St^{0.155} Q_R^{0.465} \quad (7)$$

2.4 界面波波长

Weber<sup>[16]</sup>针对圆管射流的研究表明,纤维的断裂呈长波模式,界面波波长与纤维直径间有  $\lambda/d_L = 4.50$  的关系。而 Shinjo 等<sup>[15]</sup>针对微重力条件下的圆管受限射流研究表明  $\lambda/d_L = 1.81$ ,呈短波断裂模式,如图 11 所示,在本研究的操作条件下,界面波波长主要分布在长波与短波之间,呈  $\lambda/d_L \approx 3.56$  的关系。纤维直径  $<0.5$  mm 时,界面波波长向短波模式靠拢,而当纤维直径  $>0.8$  mm 时,趋向于长波断裂模式。需要指出的是,长波断裂时,界面波必须通过具体物理实体的反射,由于多普勒频移的作用而导致界面波波长增大,而在转盘离心雾化成粒过程中,纤维来源于转盘边缘液膜的失稳纤维化而自由形成,无具体物理边界限制;另外,Shinjo 等<sup>[15]</sup>的研究针对的是微重力条件下的圆管受限射流,而在离心雾化工程中,纤维的断裂处于离心力场中,纤维在离心作用下将会被拉伸,由此导致其断裂的界面波波长增大,从这点来考虑的话,纤维的断裂应该仍以短波模式为主。

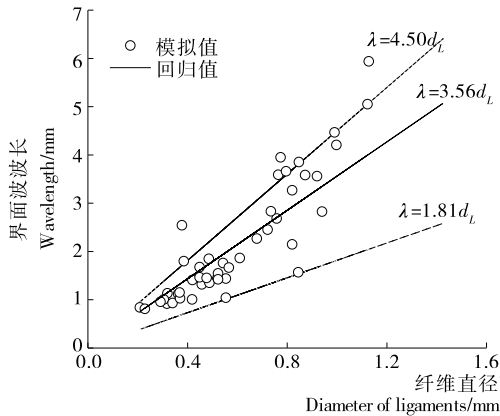


图 11 液柱尖端直径与界面波波长

Figure 11 Diameter of ligaments and wavelength of capillary waves

2.5 颗粒粒径

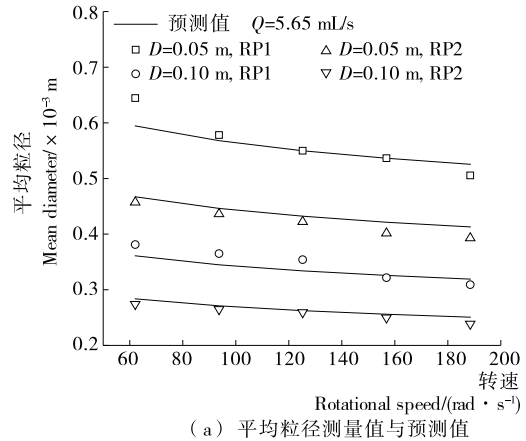
结合纤维直径  $d_L$ 、界面波波长  $\lambda$  以及式(5),颗粒平均直径  $d_m$  可以通过式(8)进行预测,式中各参数适用范围分别为  $We=1.40 \times 10^3 \sim 1.04 \times 10^5$ ,  $St=1.38 \times 10^{-3} \sim 1.39 \times 10^{-2}$ ,  $Q_R=5.79 \times 10^3 \sim 7.27 \times 10^4$ 。

$$\frac{d_m}{R} = 0.468We^{-0.056} St^{0.155} Q_R^{0.465} \quad (8)$$

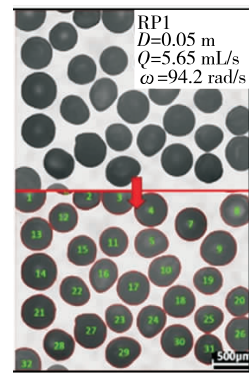
图 12 为不同转速条件下的颗粒粒径测量值与式(8)预测值对比以及给定操作条件下的颗粒样品图。由图 12 可知,试验测量值与预测结果吻合较好。对于相同的转盘结构和物料体积流量,提高转速可以缩小颗粒粒径。随着转速从 62.8 rad/s 增加至 188.5 rad/s,对于  $D=0.05$  m 的转盘,RP1 获得的颗粒平均直径由 0.64 mm 降至 0.51 mm,RP2 则由

0.45 mm 降至 0.39 mm。提高转速使得转盘表面的液膜厚度降低,液膜在转盘边缘纤维化后形成更多纤维,纤维直径相对减小,粒径也因此降低。另外,高转速条件下因液膜与转盘间速度滑移显著增大,颗粒粒径变化已不明显,因此不建议无限制增加转速来控制颗粒粒径,可以考虑如增大转盘直径或者改善转盘表面拓扑结构等途径。

如图 13 所示,颗粒的平均粒径随着物料流量的增加而



(a) 平均粒径测量值与预测值



(b) 颗粒粒径取样

图 12 不同转速条件下的颗粒平均尺寸测量值与预测值对比

Figure 12 Measured and predicted particle mean diameter at different rotational speeds

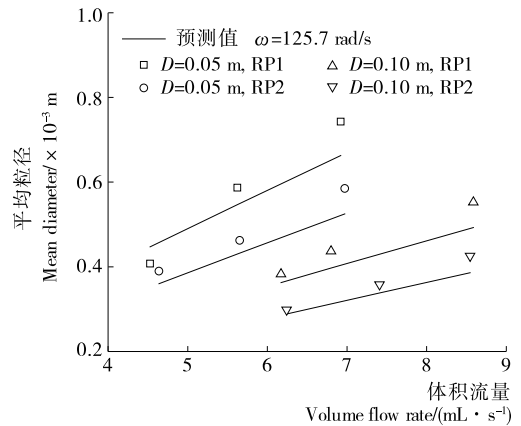


图 13 不同流量条件下的颗粒平均尺寸测量值与预测值对比

Figure 13 Measured and predicted particle mean diameter at different volume flow rates

显著增大。对于  $D=0.05$  m 的转盘,当流量由 4.53 mL/s 增加至 6.92 mL/s,RP1 的颗粒平均粒径处于 0.41~0.74 mm; RP2 处于 0.39~0.59 mm,对于  $D=0.10$  m 的转盘也可得到类似结论。完全纤维状成粒模式时,纤维数量已维持不变,物料流量的增加主要通过纤维直径的加大以及纤维长度的延伸来体现,颗粒粒径与纤维直径以及界面波波长直接相关,因此颗粒粒径随流量提高而增大。

### 3 结论

本研究针对转盘离心雾化器,采用试验研究结合数值分析方法,通过理论研究结合量纲分析,研究了松香—石蜡混合物的成粒特性,结论如下:

(1) 黏性液膜在转盘边缘破碎形成的纤维数量主要取决于无量纲韦伯数与稳定数,低黏度物料的纤维数量主要受表面张力影响,可忽略黏性力作用。

(2) 针对完全纤维状成粒模式,获得了纤维数量、纤维直径以及颗粒粒径的无量纲经验模型,为转盘离心雾化工艺调控与系统设计提供了支撑。

(3) 纤维紧缩断裂的界面波波长为纤维直径的 3.56 倍,处于 Rayleigh 长波模式与 Shinjo 短波模式之间,考虑到纤维所受离心拉伸作用,其断裂仍然为 Shinjo 短波模式。

(4) 颗粒粒径不建议仅通过转速进行调控,高转速时的液膜与转盘间速度滑移增大引起颗粒粒径已不再明显减小,可以采用如增大转盘直径或者改善转盘表面拓扑结构等途径实现。

### 参考文献

- [1] CHIANG Chia-ying, CHANG Ming-hui, LIU Hwai-shen, et al. Process intensification in the production of photocatalysts for solar hydrogen generation[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2012, 51(14): 5 207-5 215.
- [2] MASTERS K. Drying of Droplets Sprays[M]//MASTERS K. *Spray Drying Handbook*. Longman Scientific and Technical. New York: John Wiley & Sons Inc., 1988: 298-342.
- [3] 阎维平, 叶学民, 李洪涛. 液体薄膜流的流动和传热特性[J]. *华北电力大学学报*, 2005, 32(1): 59-65.
- [4] AHMED M, YOUSSEF M S. Characteristics of mean droplet size produced by spinning disk atomizers[J]. *Journal of Fluid Engineering*, 2012, 134(7): 1-9.
- [5] AHMED M, YOUSSEF M S. Influence of spinning cup and disk atomizer configurations on droplet size and velocity characteristics[J]. *Chemical Engineering Science*, 2014, 107(14): 149-157.
- [6] 王东祥, 凌祥, 彭浩, 等. 转盘表面黏性液膜稳态流动特性数值模拟[J]. *化工学报*, 2017, 68(6): 2 321-2 327.
- [7] WANG Dong-xiang, LING Xiang, PENG Hao. Theoretical analysis of free-surface film flow on the rotary granulating disk in waste heat recovery process of molten slag[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2014, 63(1): 387-395.
- [8] 王东祥, 凌祥, 彭浩, 等. 转盘边缘黏性液膜不同破碎模式临界转变特性[J]. *化工学报*, 2017, 68(11): 4 121-4 128.
- [9] TAYLOR G I. The instability of liquid surfaces when accelerated

in a direction perpendicular to their planes[J]. *P Roy Soc A-Math Phys*, 1950, 201(1 065): 192-196.

- [10] WANG Dong-xiang, LING Xiang, PENG Hao. Experimental investigation of ligament formation dynamics of thin viscous liquid film at spinning disk edge[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2016, 55(34): 9 267-9 275.
- [11] KAMIYA T. An analysis of the ligament-type disintegration of thin liquid film at the edge of a rotating disk[J]. *J Chem Eng Jpn*, 1972, 5(4): 391-396.
- [12] KAMIYA T, KAYANO A. Disintegration of viscous fluid in the ligament state purged from a rotating disk[J]. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 1971, 4(4): 364-369.
- [13] WANG Dong-xiang, LING Xiang, PENG Hao. Simulation of ligament mode breakup of molten slag by spinning disk in the dry granulation process[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 84: 437-447.
- [14] FROST A R. Rotary atomization in the ligament formation mode[J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1981, 26(1): 63-78.
- [15] SHINJO J, UMEMURA A. Simulation of liquid jet primary breakup: dynamics of ligament and droplet formation[J]. *Int J Multiphas Flow*, 2011(36): 513-532.
- [16] WEBER C. On the disruption of liquid jet[J]. *J Appl Math Mech*, 1931(2): 136-159.
- [17] JOSEPH D D, BEAVERS G S, FUNADA T. Rayleigh-Taylor instability of viscoelastic drops at high weber numbers[J]. *J Fluid Mech*, 2002(453): 109-132.
- [18] QUAN S P. Simulations of multiphase flows with multiple length scales using moving mesh interface tracking with adaptive meshing[J]. *J Comput Phys*, 2011(230): 5 430-5 448.
- [19] SRINIVASAN V, SALAZAR A J, SAITO K. Modeling the disintegration of modulated liquid jets using volume-of-fluid (VOF) methodology[J]. *Appl Math Model*, 2011(35): 3 710-3 730.
- [20] DELTEIL J, VINCENT S, ERRIGUIBLE A, et al. Numerical investigations in rayleigh breakup of round liquid jets with VOF methods[J]. *Comput Fluids*, 2011(50): 10-23.

(上接第 48 页)

- [7] BAKER R R. *Smoke chemistry* [M]// DAVIS D Layten, NIELSEN Mark T. *Tobacco: production, chemistry and technology*. Malden: Blackwell Science, 1999: 398-439.
- [8] LIU C, FENG S, HEEMST J V, et al. New insights into the formation of volatile compounds in mainstream cigarette smoke[J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2010, 396: 1 817-1 830.
- [9] MURAMATSU M. Studies on the transport phenomena in naturally smouldering cigarettes[J]. *Science Papers Central Research Institute Japan Tobacco Salt Monopoly Corp*, 1981, 123: 9-77.
- [10] 吴添文, 毛文斌, 李巧灵, 等. 卷烟燃吸时苯酚释放的深入研究[J]. *广东化工*, 2018, 45(19): 59-63.