

研究论文

DOI: 10.11949/j.issn.0438-1157.20170040

转盘表面黏性薄液膜稳态流动特性数值模拟

王东祥^{1,2}, 凌祥², 彭浩², 杨新俊^{1,2}, 崔政伟¹

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

² 南京工业大学江苏省过程强化与新能源装备技术重点实验室, 江苏 南京 211800)

摘要: 转盘表面薄膜流广泛存在于转盘反应器、造粒和分子蒸馏等化工领域, 其流动特性对造粒、反应以及热质传递具有重要影响。建立了稳态薄膜流动特性理论模型, 并对比实验数据与数值模拟结果, 研究了等效 Froude 数 Fr 、量纲 1 特征厚度与长度比值 ε 和浇注尺寸 r_i 对薄膜厚度分布的影响, 导出了水跃和同步区半径模型并通过实验验证。结果表明: 等效 Froude 数 Fr 不会对薄膜厚度分布产生明显影响; 量纲 1 ε 和浇注尺寸 r_i 是水跃发生与否的决定条件, 增大 ε 或缩小 r_i 有助于水跃出现, 水跃半径稳定于 $r=0.85$; 平均径向速度呈典型三分区特征, 缩小浇注尺寸 r_i 将引起浇注区范围加大而加速区范围显著缩小, 导致薄膜无明显加速现象而直接进入同步区, 但同步区半径维持在 $r=1.53$ 。研究结果为转盘反应器以及离心粒化器等的设计与优化提供了可借鉴的理论与应用基础。

关键词: 流体力学; 模型; 实验验证; 流域; 转盘; 稳态流

中图分类号: TQ 021.1

文献标志码: A

文章编号: 0438—1157 (2017) 06—2321—07

Numerical simulation of stable flow dynamics of viscous film on spinning disk surface

WANG Dongxiang^{1,2}, LING Xiang², PENG Hao², YANG Xinjun^{1,2}, CUI Zhengwei¹

(¹ Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment & Technology, School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, Jiangsu, China; ² Jiangsu Key Laboratory of Process Enhancement and New Energy Equipment Technology, Nanjing Tech University, Nanjing 211800, Jiangsu, China)

Abstract: Film flow on spinning disk surface exists extensively in chemical engineering operations, such as centrifugal graining, molecular distillation and spinning disk reactors. Flow dynamics of the film flow has a major impact on graining, reaction, heat and mass transfer rate. Theoretical model of stable film flow dynamics was established and verified by comparison of experimental results and numerical simulations. The effect of equivalent Froude number, dimensionless ratio of characteristic thickness over length ε , and casting size r_i on dimensionless film thickness distribution was studied, which a model of dimensionless hydraulic jump and synchronized zone radius was derived and verified by experiments. The results show that equivalent Froude number has little effect on film thickness distribution and occurrence of hydraulic jump phenomenon mainly depends upon ε and r_i . Increasing ε or decreasing r_i leads to appearance of hydraulic jump with a dimensionless hydraulic jump radius always at $r=0.85$. Mean radial velocity exhibited features of typical three zone distribution. Reducing casting size would extend injection zone and shrink acceleration zone, such that film flow goes directly to synchronized zone at dimensionless synchronized radius of 1.53 without evident acceleration. The results will provide theoretical

2017-01-10 收到初稿, 2017-02-16 收到修改稿。

联系人: 凌祥。第一作者: 王东祥 (1985—), 男, 博士, 讲师。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51606086, 51406078)。

Received date: 2017-01-10.

Corresponding author: Prof. LING Xiang, xling@njtech.edu.cn

Foundation item: supported by the National Natural Science Foundation of China (51606086, 51406078).

reference for design and optimization of spinning disk reactors and centrifugal pelletizers.

Key words: fluid mechanics; model; experimental validation; flow regimes; spinning disk; steady flow

引 言

液体在转盘表面因离心作用以薄层形式向外流动形成薄膜流,具有高热质传递系数等独特优点,广泛存在于分子蒸馏^[1]、转盘反应器^[2-8]、离心造粒^[9-11]以及高温熔融渣料余热回收^[12-14]等领域。薄膜流体自由液面形状或者液膜厚度对造粒和热质传递具有重要影响^[15-18]。如可调控液膜厚度以避免传热表面发生干斑或干区而导致热敏性物料变味变质、非热敏性物料结焦,以至覆盖传热界面引起传热能力或者反应速率的显著下降^[19-20];在转盘粒化法回收熔融渣料余热工艺中,液膜厚度决定了流体在转盘边缘的破碎形态^[21-23],进而作用于熔融渣颗粒的凝固换热和物相转变^[24],是影响余热回收效率和渣料资源化再利用的重要因素。

Emslie 等^[25]最早探索转盘表面的薄膜流动行为,研究发现若忽略薄膜与转盘间的速度滑移(即忽略科式力),薄膜流理论上由黏性力与离心力共同作用,较大 Ekman 数 Ek ($Ek > 1$) 条件下的液膜厚度 h 与转盘径向距离 r 间满足 $h \propto r^{-2/3}$,提出了离心模型。在一些特殊条件下,某一转盘区域的液膜厚度会显著上升,形成水跃^[26-29],但实现水跃半径的理论预测还鲜有涉及。Wang 等^[30]在离心模型基础上考虑了速度滑移的影响,研究发现离心模型只适用于水跃之后的薄膜流,科式力会显著提高水跃区域的薄膜厚度。Woods^[31]分析了强惯性力 ($Ek < 1$) 薄膜流,提出了 Pigford 模型。Burns 等^[32]采用电阻法对薄膜流的平均径向速度进行测量,发现径向速度分布可分为浇注区、加速区以及同步区,并提出黏性因子,对 Pigford 模型进行了修正。Sisoev 等^[33]研究发现空气诱导剪切力引起薄膜表面可能伴随波动,但平均液膜厚度不会显著改变,转盘轴心和边缘区域的液膜近似呈稳态流动^[34]。

现有研究工作主要针对转盘轴心或边缘区域的薄膜流动行为。本文针对整个转盘表面薄膜流体的稳态流动特性,采用量纲 1 分析与积分平均法简化 Navier-Stokes (N-S) 方程,建立稳态薄膜流动特性理论模型,研究薄膜自由液面形状和液膜厚度分布,同时探讨水跃和同步区演化的一般规律,为转盘反应器以及离心粒化器等的设计与优化提供可

借鉴的理论与应用基础。

1 稳态薄膜流动模型

1.1 控制方程量纲 1 化

工质以恒定流量沿转盘轴心浇注,液膜呈旋转周期性流动。考虑一无限大转盘,水平放置,以恒定角速度 ω 沿 z 轴旋转。工质浇注口半径为 r_{in} ,流量为 Q ,牛顿流体,不可压缩,完全润湿转盘表面。液膜厚度分布如图 1 所示, r_j 为水跃半径。

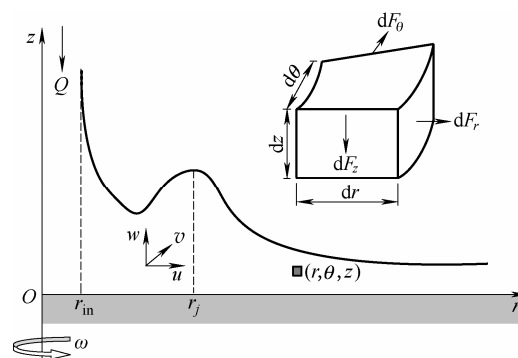


图 1 转盘表面液膜厚度分布

Fig.1 Liquid film thickness distribution on spinning disk

参考系固定于转盘,微团所受体积力为

$$dF = -\rho[2\omega \times v + \omega \times (\omega \times r) + g]drd\theta dz \quad (1)$$

式中, ρ 为工质密度, ω 为转盘转速, v 为液膜与转盘之间相对速度, g 为重力加速度。

将式 (1) 代入 Navier-Stokes (N-S) 方程并进行量纲 1 化处理化简方程,引入薄膜特征厚度 δ_0 以及特征长度 l_0 ^[29,34]

$$\delta_0 = \left(\frac{\nu}{\omega}\right)^{0.5}, \quad l_0 = \left(\frac{9Q^2}{4\pi^2\omega\nu}\right)^{0.25} \quad (2)$$

式中, ν 为工质运动黏度。基于相似定律,速度尺度和压力尺度分别为

$$u_0 = v_0 = \omega l_0, \quad w_0 = \omega \delta_0, \quad p_0 = \rho \omega^2 l_0^2 \quad (3)$$

结合式 (1) ~ 式 (3) 处理连续性方程和 N-S 方程可得式 (4) ~ 式 (7)。 u 、 v 、 w 、 p 分别为量纲 1 速度和压力, $\varepsilon = \delta_0/l_0$, $Fr = \omega^2 l_0/g$ 。

$$\frac{1}{r} \frac{\partial(ru)}{\partial r} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

$$u \frac{\partial u}{\partial r} + w \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{v^2}{r} = -\frac{\partial p}{\partial r} + 2v + r + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \varepsilon^2 \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{u}{r^2} \right) \quad (5)$$

$$u \frac{\partial v}{\partial r} + w \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{uv}{r} = -2u + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} + \varepsilon^2 \left(\frac{\partial^2 v}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{v}{r^2} \right) \quad (6)$$

$$\varepsilon^2 \left(u \frac{\partial w}{\partial r} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} - \varepsilon Fr^{-1} + \varepsilon^2 \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} + \varepsilon^4 \left(\frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} \right) \quad (7)$$

1.2 薄膜近似

浇注口尺寸一般满足 $r_{in} \ll l_0$, 薄膜特征厚度 δ_0 相比其特征长度 l_0 为微量, 可采用薄膜近似^[30], 即 $\varepsilon = \delta_0/l_0 \ll 1$, 式(4)~式(7)中的 ε^2 和 ε^4 项均可忽略; 采用积分平均法将式(4)~式(7)中的物理量按照 $\bar{f} = \delta^{-1} \int_0^\delta f dz$ 处理。变换后, 式(4)~式(7)进一步简化为式(8)。为便于理解, 式(8)中已略去所有物理量的上划线。

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \begin{pmatrix} r \delta u \\ \frac{6}{5} r \delta u^2 \\ \frac{17}{14} r \delta uv \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{155}{126} \frac{\delta v^2}{r} + 2\delta v + \frac{5}{6} \left(r - \frac{\partial p}{\partial r} \right) \delta - \frac{5}{2} \frac{u}{\delta} \\ -\frac{17}{14} \frac{\delta uv}{r} - 2\delta u - \frac{5v}{2\delta} \end{pmatrix} \quad (8)$$

式中, $p = p_s + Fr\delta$, Fr 为等效 Froude 数, p_s 为大气压强。

1.3 边界条件

薄膜流表面需满足运动学以及应力平衡边界条件。Kim 等^[29]认为 r_i 处的切向速度可采用式(9)计算, 但并未给出 r_i 的计算方法。而工质浇注条件(浇注尺寸或浇注速度)均有可能影响薄膜流特性, 可定义 $r_i = r_{in}/l_0$ 。若忽略工质冲击转盘引起的微弱能量损失, 动能由轴向完全转变为径向, r_i 处平均径向速度可以近似为式(10), $r = r_i$ 处的液膜厚度应满足连续性方程式(11)。综上, 式(8)需满足边界条件式(9)~式(11)。

$$v_i = -\frac{14}{17} r_i \quad (9)$$

$$u_i = \frac{Q}{\pi r_{in}^2 l_0 \omega} = \frac{2}{3} \varepsilon r_i^{-2} \quad (10)$$

$$\delta_i = \frac{Q}{2\pi r_{in} u_i u_0 \delta_0 l_0} = \frac{1}{3r_i u_i} \quad (11)$$

1.4 模型验证

薄膜流厚度一般在数百微米, 测量方法一般为探针法^[28]和电阻法^[26,32]。图2、图3为式(8)预测值分别与 Leshev 等^[28]的探针法和 Miyasaka^[26]的电阻法测量值对比, 工质均为甘油水溶液。Miyasaka^[26]的实验条件为 $\rho = 1200 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, $\mu = (3 \sim 8) \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$, 进口 Re_{in} 为 200, $m = 0.1 \sim 0.3$ 。可以看出, 薄膜的厚度分布与实验测量吻合得很好。Miyasaka 在实验

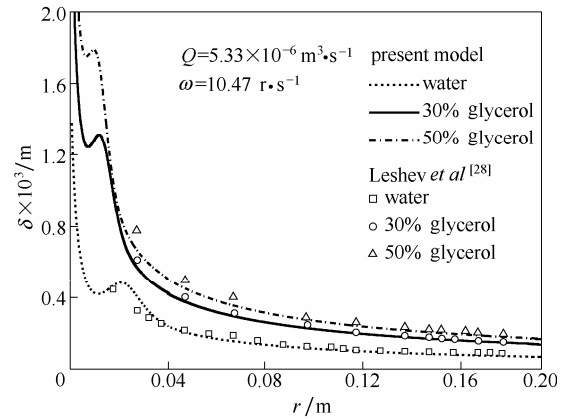


图2 液膜厚度预测值与 Leshev 等^[28]实验测量对比
Fig. 2 Comparison of film thickness predicted by present model with that measured by Leshev *et al*^[28]

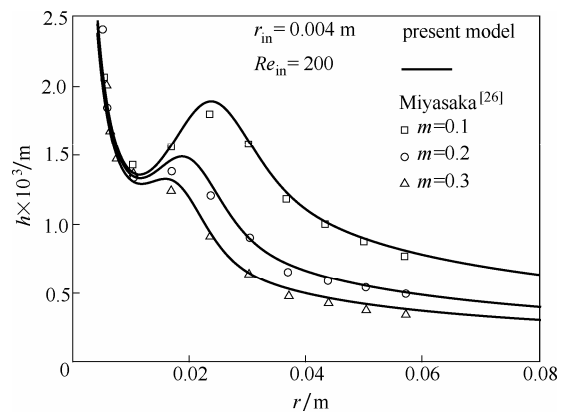


图3 液膜厚度预测值与 Miyasaka^[26]实验测量对比
Fig. 3 Comparison of film thickness predicted by present model with that measured by Miyasaka^[26]

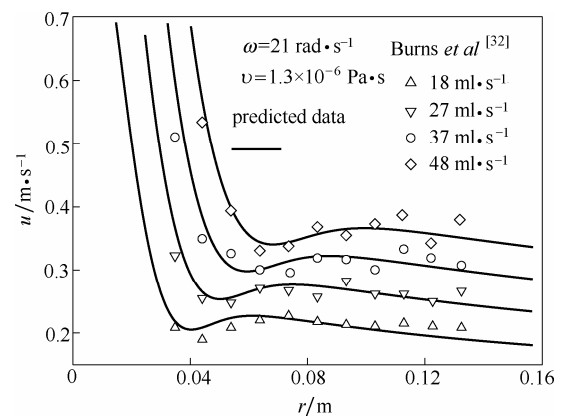


图4 径向速度预测值与 Burns 等^[32]实验测量对比
Fig. 4 Comparison of radial velocity distribution predicted by present model with that measured by Burns *et al*^[32]

中观察到了水跃现象, 从图3可以看出, 式(8)准确地预测到了水跃的发生半径, 并且薄膜厚度与测量值也完全吻合。

Burns 等^[32]采用电阻法对薄膜平均径向速度进

行了测量,发现径向速度分布可分为浇注区、加速区以及同步区。由图 4 可以看出,式(8)对薄膜流径向速度的预测值与测量值吻合得很好,完全可以体现速度的三分区特征。

2 结果与讨论

2.1 液膜厚度分布

由式(8)~式(11)可以看出,薄膜流的流动特性与等效 Froude 数 Fr 、浇注口半径 r_i 以及 ε 有关。图 5 为 $\varepsilon=0.01$ 与 $r_i=0.1$ 时不同 Fr 的薄膜厚度(或自由液面形状)沿径向的分布。可以看出,随着 Fr 由 0 增至 0.04,薄膜厚度自浇注口后先呈微弱下降,而后再在水跃半径处汇聚,在水跃之后的薄膜流同样先微弱下降而后完全重合。水跃半径 r_j 则不受 Fr 控制始终维持在 0.85 左右,另外对于 $r>1.5$ 的转盘区域,薄膜流自由液面完全重合。因此 Fr 只对水跃附近的薄膜流产生了微弱影响,而不会改变水跃半径以及远离转盘轴心的薄膜流特性,忽略 Fr 后在 $r=0.48$ 处引入的最大误差小于 3%。从式(8)可以看出,等效 Froude 数 Fr 对薄膜流的影响主要通过薄膜流体压强来体现,但由于薄膜流厚度一般在数百微米,其内部压强近似等于自由液面的大气压强而没有显著改变,即使 Froude 数在 $0.25\sim\infty$ 范围时也不会对薄膜流自由液面形状产生显著影响。

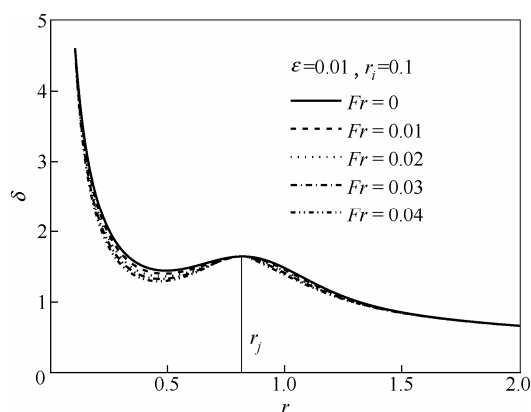


图 5 Fr 对液膜径向厚度分布的影响

Fig. 5 Effect of Fr on radial liquid film thickness distribution

图 6 为 $Fr=0$ 与 $r_i=0.1$ 时不同 ε 值的薄膜厚度径向分布。随着 ε 由 0.001 增至 0.2,薄膜流从无水跃现象逐渐过渡到明显的发生水跃,水跃半径最终稳定于 $r=0.85$ 的转盘位置;当 $r<1.5$ 时,薄膜厚度呈显著下降直至 $\varepsilon>0.05$ 后趋于稳定,而 $r>1.5$ 转盘区域的薄膜流则不受 ε 影响,完全重合。由于相同浇注条件下 ε 主要体现了转速对薄膜流的影响,因此水跃

现象是否发生与转盘转速直接相关。图 7 所示为 $Fr=0$ 与 $\varepsilon=0.01$ 时不同浇注口尺寸 r_i 的薄膜厚度分布。其变化规律与图 6 类似,浇注口半径 $r_i<0.1$ 时水跃现象开始于 $r=0.85$ 处出现,当 r_i 降至 0.02 以下时,水跃稳定且自由液面开始趋于一致。Wang 等^[30]采用 CFD 方法对不同浇注口尺寸 r_{in} 时的薄膜流特性进行了数值分析,其中 $Q=45\text{ ml}\cdot\text{s}^{-1}$, $\rho=2590\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, $\mu=0.7\text{ Pa}\cdot\text{s}$, $\sigma=0.478\text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$, $\omega=209.4\text{ r}\cdot\text{s}^{-1}$ 。从图 8 同样可以看出,相同工况条件下浇注口尺寸显著影响水跃是否发生和水跃前的薄膜厚度,而对水跃后区域则无影响。

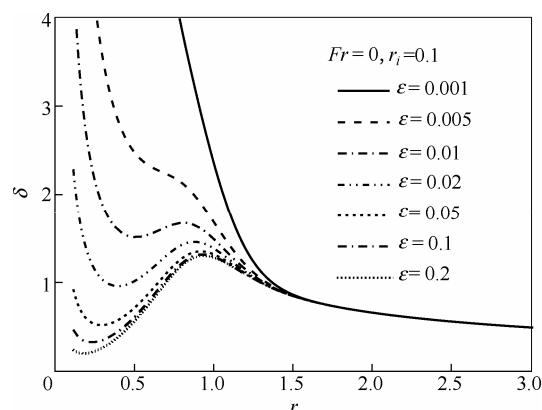


图 6 ε 值对液膜径向厚度分布的影响

Fig. 6 Effect of ε on radial liquid film thickness distribution

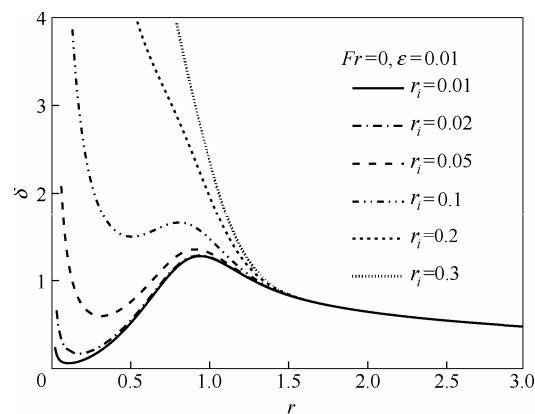
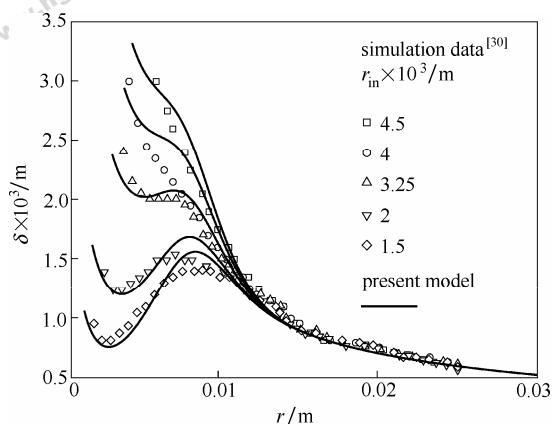


图 7 r_i 值对液膜径向厚度分布的影响

Fig. 7 Effect of r_i on radial liquid film thickness distribution

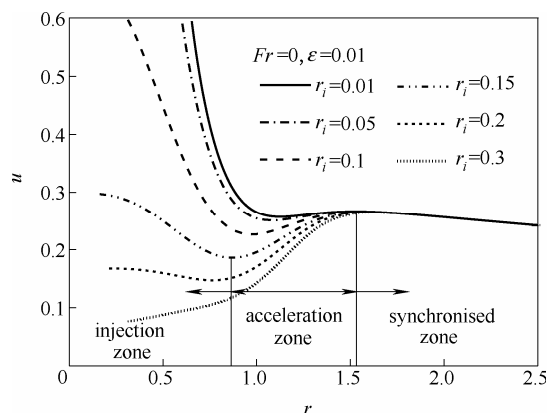
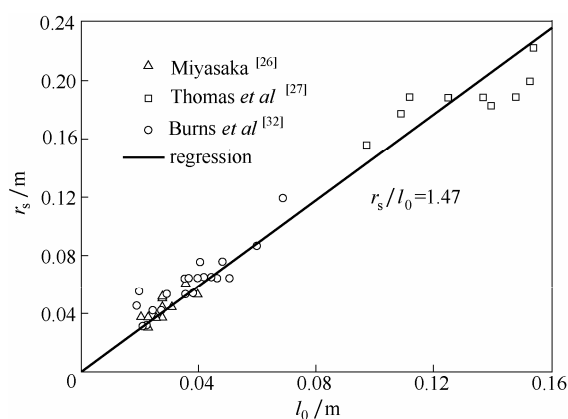
结合图 6 和图 7 可以看出,相同工况下,工质进口条件(浇注口尺寸、浇注流量)以及转盘转速直接决定了水跃现象是否发生,并且影响 $r<1.5$ 转盘区域的薄膜流特性。但水跃的发生半径始终维持在 $r=0.85$ 左右, $r>1.5$ 转盘区域的薄膜流特性也不受影响。原因主要在于以 $r=1.5$ 为界, $r>1.5$ 薄膜流径向流动特性主要受离心力和黏性力控制,而 $r<1.5$ 的区域作用力主要为惯性力和黏性力。对于给定的

图8 液膜厚度预测值与 CFD 模拟结果^[30]对比Fig. 8 Liquid film thickness predicted by present model and CFD simulation^[30]

浇注流量, 浇注口尺寸缩小引起工质冲击转盘轴心速度的显著上升, 在黏性力作用下浇注区速度急剧缩小, 工质由急流转变为缓流, 部分动能转化为位能而导致水跃现象的发生。而增大转盘转速时, 惯性力影响区域减小, 离心作用区域加大而引起薄膜快速进入加速区而无水跃现象发生。

2.2 同步区半径

Burns 等^[32]采用电阻法对薄膜流的平均径向速度进行测量, 发现径向速度分布可分为浇注区、加速区以及同步区。以图 9 中 $r_i=0.15$ 为例, 工质浇注至转盘轴心后由于黏性力作用引起速度下降, 在水跃附近速度降至最低, 而后离心力引起薄膜切向速度逐渐与转盘一致, 径向速度也同时上升直至 $r=1.53$ 处达到最大, 最终进入同步区。但从图 9 也可以看出, 随着浇注口尺寸的缩小或薄膜流惯性力的增大, 浇注区范围逐渐加大, 工质速度因黏性减速效果也越明显, 而加速区范围显著缩小, 薄膜无明显加速现象, 但不影响同步区尺寸。图 10 所示为

图9 r_i 值对薄膜平均径向速度分布的影响Fig. 9 Effect of r_i on mean radial velocity distribution图10 同步区半径文献测量结果回归^[26-27,32]Fig. 10 Regression of synchronized radius measured in references^[26-27,32]

根据文献测量数据得到的同步区半径回归方程。可以看出, 量纲 1 同步区半径 $r=1.47$, 与本文的理论分析结果基本一致, 这也验证了本文的研究结论。

3 结 论

本文以转盘表面薄膜流稳态流动特性为研究对象, 采用量纲 1 分析与积分平均法化简 N-S 方程, 建立了量纲 1 薄膜流理论模型, 研究了等效 Froude 数 Fr 、量纲 1 ε 和浇注口尺寸 r_i 对量纲 1 薄膜厚度分布的影响, 探讨了薄膜流水跃半径以及同步区半径与操作参数的一般规律。得到以下结论。

(1) 等效 Froude 数 Fr 在 $0 \sim 0.04$ 范围内时, Fr 对薄膜流的影响主要通过薄膜流体压强来体现, 但由于薄膜流厚度一般在数百微米, 其内部压强近似等于自由液面的大气压强而没有显著改变, 不会对量纲 1 薄膜厚度产生明显影响, 进而水跃半径与 Fr 无关。

(2) 量纲 1 ε 以及浇注口尺寸 r_i 直接决定了水跃现象是否发生。浇注口尺寸缩小引起工质冲击转盘轴心速度显著上升, 黏性力引起浇注区速度由急流急剧向缓流转变, 流体位能增大而有利于水跃发生; 而惯性力影响区域随转盘转速增大而减小, 离心作用区域加大而引起薄膜快速进入加速区而无水跃现象发生。增大 ε 或者缩小 r_i 均有利于水跃的发生, 量纲 1 水跃半径始终维持在 $r=0.85$ 。

(3) $r > 1.53$ 区域的薄膜流径向流动特性主要受离心力和黏性力控制, 而 $r < 1.53$ 的区域作用力主要为惯性力和黏性力, 由此导致薄膜的平均径向速度呈现典型三分区特征, 缩小浇注口尺寸 r_i 将引起浇注区范围加大而加速区范围显著缩小, 导致薄膜无

明显加速现象而直接进入同步区, 但同步区半径始终维持在 $r=1.53$, 与实验测量结果 $r=1.47$ 基本一致。

符 号 说 明

- F ——力, N
 g ——重力加速度, $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$
 h ——薄膜厚度, m
 l_0 ——薄膜特征长度, m
 p ——量纲 1 薄膜流压强
 p_s ——大气压强, Pa
 Q ——工质流量, $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$
 r ——量纲 1 转盘半径
 r_i ——量纲 1 进口半径
 r_{in}, r_j, r_s ——分别为工质进口半径、水跃半径与同步区半径, m
 u, v, w ——分别为薄膜径向、切向与轴向速度, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
 u_0, v_0, w_0 ——分别为量纲 1 薄膜径向、切向与轴向速度
 δ_0 ——薄膜特征厚度, m
 ε ——薄膜特征厚度与长度比值
 μ ——工质动力黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$
 ρ ——工质密度, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
 ν ——工质运动黏度, $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$
 ω ——转盘转速, $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$
- 下角标
 i ——浇注进口
 j ——水跃半径
 0 ——特征参数

References

- [1] BATISTELLA C B, MORAES E B, MACIEL W M R. Comparing centrifugal and falling film molecular stills using reflux and cascade for fine chemical separations[J]. Computers & Chemical Engineering, 1999, **23**: S767-S770.
- [2] BOIARKINA I, NORRIS S, PATTERSON D A. Investigation into the effect of flow structure on the photocatalytic degradation of methylene blue and dehydroabietic acid in a spinning disc reactor[J]. Chemical Engineering Journal, 2013, **222**(4): 159-171.
- [3] 韩进, 朱彤, 今井刚, 等. 基于高速转盘法的剩余污泥可溶化处理[J]. 化工学报, 2008, **59**(2): 478-483.
 HAN J, ZHU T, JIN J G, *et al.* Solubilization of excess sludge by high speed rotary disk[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering (China), 2008, **59**(2): 478-483.
- [4] 李丹, 张大皓, 谭天伟. 转盘反应器固定根霉重复批次发酵生产脂肪酶[J]. 化工学报, 2007, **58**(9): 2347-2351.
 LI D, ZHANG D H, TAN T W. Product ion of lipase by repeated batch fermentation with immobilized *Rhizopus arrhizus* using rotating biological contactor[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering (China), 2007, **58**(9): 2347-2351.
- [5] 任南琪, 周显娇, 郭婉茜, 等. 染料废水处理技术研究进展[J]. 化工学报, 2013, **64**(1): 84-94.
 REN N Q, ZHOU X J, GUO W Q, *et al.* A review on treatment methods of dye wastewater[J]. CIESC Journal, 2013, **64**(1): 84-94.
- [6] 孙志成, 韩进, 张明杨, 等. 机械转盘联合超声破解剩余污泥[J]. 化工学报, 2016, **67**(12): 5229-5236.
 SUN Z C, HAN J, ZHANG M Y, *et al.* Disintegration of excess sludge by mechanical rotary disk combination with ultrasonication[J]. CIESC Journal, 2016, **67**(12): 5229-5236.
- [7] BOIARKINA I, NORRIS S, PATTERSON D A. Investigation into the effect of flow structure on the photocatalytic degradation of methylene blue and dehydroabietic acid in a spinning disc reactor[J]. Chemical Engineering Journal, 2013, **222** (4): 159-171.
- [8] 魏冰, 张巧玲, 刘有智, 等. 旋转盘反应器光催化降解苯酚废水动力学[J]. 环境工程学报, 2016, **10**(3): 1305-1309.
 WEI B, ZHANG Q L, LIU Y Z, *et al.* Kinetics of phenol by photocatalysis degradation in spinning disk reactor[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, **10**(3): 1305-1309.
- [9] WANG D X, LING X, PENG H, *et al.* Experimental investigation of ligament formation dynamics of thin viscous liquid film at spinning disk edge[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2016, **55**(34): 9267-9275.
- [10] 吴君军, 王宏, 朱恂, 等. 转盘离心粒化中丝状成粒特性[J]. 化工学报, 2015, **66**(7): 2474-2480.
 WU J J, WANG H, ZHU X, *et al.* Characteristic of ligament in centrifugal granulation by spinning disc[J]. CIESC Journal, 2015, **66**(7): 2474-2480.
- [11] 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.
- [12] ZHANG H, WANG H, ZHU X, *et al.* A review of waste heat recovery technologies towards molten slag in steel industry[J]. Applied Energy, 2013, **112**(4): 956-966.
- [13] BARATI M, ESFAHANI S, UTIGARD T A. Energy recovery from high temperature slags[J]. Energy, 2011, **36**(9): 5440-5449.
- [14] WANG D X, LING X, PENG H. Simulation of ligament mode breakup of molten slag by spinning disk in the dry granulation process[J]. Applied Thermal Engineering, 2015, **84**: 437-447.
- [15] JACOBSEN N C, HINRICHSSEN O. Micromixing efficiency of a spinning disk reactor[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2012, **51**(36): 11643-11652.
- [16] 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.
- [17] BOIARKINA I, NORRIS S, PATTERSON D A. The case for the photocatalytic spinning disc reactor as a process intensification technology: comparison to an annular reactor for the degradation of methylene blue[J]. Chemical Engineering Journal, 2013, **225**(3): 752-765.
- [18] CAPRARIIS B D, RITA D M, STOLLER M, *et al.* Reaction-precipitation by a spinning disc reactor: influence of hydrodynamics on nanoparticles production[J]. Chemical Engineering Science, 2012, **76**(28): 73-80.
- [19] 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.
 YAN W P, YE X M, LI H T. Hydrodynamics and heat transfer of liquid thin films[J]. Journal of North China Electric Power University, 2005, **32**(1): 59-65.
- [20] CHIANG C, CHANG M, LIU H, *et al.* Process intensification in the

- production of photocatalysts for solar hydrogen generation[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2012, **51**(14): 5207-5215.
- [21] PENG H, WANG N, WANG D X, *et al.* Experimental study on critical characteristics of liquid atomization by spinning disk[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2016, **55**(21): 6175-6185.
- [22] 王东祥, 凌祥, 彭浩. 转盘离心粒化熔渣液膜流动特性数值模拟研究[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2015, **37**(3): 67-73.
WANG D X, LING X, PENG H. Numerical simulation of film flow characteristics of molten slag on spinning disk in centrifugal atomization process[J]. Journal of Nanjing Tech University (Natural Science Edition), 2015, **37**(3): 67-73.
- [23] WANG D X, LING X, PENG H, *et al.* Experimental investigation of ligament formation dynamics of thin viscous liquid film at spinning disk edge[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2016, **55**(34): 9267-9275.
- [24] 何先琰, 王宏, 朱恂, 等. 铅锡合金熔融颗粒风冷相变换热特性实验研究[J]. 工程热物理学报, 2015, **36**(8): 1748-1751.
HE X Y, WANG H, ZHU X, *et al.* Experiment study on air-cooled phase change heat transfer characteristics of Sn-Pb alloy droplets[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2015, **36**(8): 1748-1751.
- [25] EMSLIE A G, BONNER F T, PECK L G. Flow of a viscous liquid on a rotating disk[J]. Journal of Applied Physics, 1958, **29**(5): 858-862.
- [26] MIYASAKA Y. On the flow of a viscous free boundary jet on a rotating disk[J]. Bulletin of the JSME, 1974, **40**(331): 1461-1468.
- [27] THOMAS S, FAGHRI A, HANKEY W. Experimental analysis and flow visualization of a thin liquid film on a stationary and rotating disk[J]. Journal of Fluids Engineering, 1991, **113**(1): 73-80.
- [28] LESHEV I, PEEV G. Film flow on a horizontal rotating disk[J]. Chemical Engineering and Processing, 2003, **42** (11): 925-929.
- [29] KIM T S, KIM M U. The flow and hydrodynamic stability of a liquid film on a rotating disc[J]. Fluid Dynamics Research, 2009, **41**(3): 475-479.
- [30] WANG D X, LING X, PENG H. 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.
- [31] WOODS W P. The hydrodynamics of thin liquid films flowing over a rotating disk[D]. United Kingdom: University of Newcastle, 1995.
- [32] BURNS J R, RAMSHAW C, JACHUCK R J. Measurement of liquid film thickness and the determination of spin-up radius on a rotating disc using an electrical resistance technique[J]. Chemical Engineering Science, 2003, **58** (11): 2245-2253.
- [33] SISOEV G M, MATER O K, LAWRENCE C J. Axisymmetric wave regimes in viscous liquid film flow over a spinning disk[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2003, **495**(495): 385-411.
- [34] PRIELING D, STEINER H. Unsteady thin film flow on spinning disks at large ekman numbers using an integral boundary layer method[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013, **65**(7): 10-22.