

文章编号:0253-4339(2025)04-0106-09

doi:10.12465/j.issn.0253-4339.2025.04.106

# 冰浆在水平圆管过渡区内流动特性的影响因素

郝达云<sup>1</sup> 王悦<sup>1</sup> 王晓春<sup>1,2</sup>

(1 苏州科技大学环境科学与工程学院 苏州 215009; 2 苏州科技大学天平学院 苏州 215009)

**摘要** 冰浆等含有大量悬浮颗粒的固-液两相浆体,在管道内的流动形态决定了其阻力特性。为确保浆体输运系统的安全、节能运行并预防堵塞,通过实验研究了浆体在管道内的流动特性及其临界雷诺数( $Re_c$ )。重点分析了过渡区内浆体的流动形态、固相含量、颗粒粒径和管径对浆体流动特性的影响。结果表明:固相含量的增加会使 $Re_c$ 增大,而管径和粒径的增加会导致 $Re_c$ 的降低;浆体的流态转变发生在雷诺数 $Re$ 为1700~2600;当在过渡区间,浆体的阻力系数随 $Re$ 的增加呈先增大后减小的趋势。

**关键词** 冰浆;固-液两相流;流动特性;临界雷诺数;阻力系数

中图分类号:TB61<sup>+</sup>1;TB657.5

文献标识码:A

## Influencing Factors of Flow Characteristics of Ice Slurry in the Flow Transition Zone of Horizontal Circular Tubes

Hao Dayun<sup>1</sup> Wang Yue<sup>1</sup> Wang Xiaochun<sup>1,2</sup>

(1. School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou, 215009, China; 2. Tianping College of Suzhou University of Science and Technology, Suzhou, 215009, China)

**Abstract** Slurries containing a large number of suspended particles, such as ice slurries, have a strong correlation between internal flow patterns and resistance characteristics. The study of its flow characteristics is of great significance for ensuring safety, energy saving, and the prevention of blockages in slurry transportation systems. To ensure safe and energy-efficient operation of the slurry transport system and prevent blockages, this study experimentally investigated the flow characteristics of slurry in pipelines and its critical Reynolds number ( $Re_c$ ). The focus is on analyzing the flow behavior of the slurry in the transition region, as well as the effects of the ice packing factor (IPF), particle size, and pipe diameter on the slurry flow properties. The results show that the  $Re_c$  increases with an increase in the IPF, while the  $Re_c$  decreases with an increase in the pipe diameter and particle size. The flow regime transition of the slurry occurred within the Reynolds number ( $Re$ ) range of approximately 1700-2600. In the transition region, the resistance coefficient of the slurry first increases and then decreases as the  $Re$  increases.

**Keywords** ice slurry; solid-liquid two-phase flow; flow characteristics; critical Reynolds number; resistance coefficient

在化工、矿业、能源和环保等多个领域,固液两相流水力管道输送系统得到了广泛应用<sup>[1-4]</sup>。在固液两相流水力管道输送系统中,冰浆因其具有可运输性、制冷效率高、储能密度高等<sup>[5-7]</sup>优点备受关注。一般冰浆含冰率(ice packing factor, IPF)大于5%时认为是非牛顿流体<sup>[8]</sup>,其流态转变的临界雷诺数 $Re_c$ 与牛顿流体有所不同。 $Re_c$ 对浆体在管道流动有重要影响。在达到 $Re_c$ 时,浆体展现出最优的减阻性能<sup>[9-10]</sup>。而 $Re_c$ 受到多种因素的影响。F. C. Li等<sup>[11]</sup>对流经不同管径流体的减阻特性进行了研究,结果表明,相同质量分数的表面活性剂减阻流体的 $Re_c$ 随管径的增大而增大。闫雪等<sup>[12]</sup>类比流体力学中的层流和湍流,发现 $Re_c$ 的大小受颗粒物料类型的

影响。Cai Shupeng等<sup>[13]</sup>发现最大减阻率对应的 $Re_c$ 随温度的升高而增大。田兴旺等<sup>[14]</sup>指出随着幂律指数的增加,幂律流体的 $Re_c$ 逐渐增大,但随着通道与颗粒直径比值的增大, $Re_c$ 逐渐减小,最终趋于某一定值。按照浆体雷诺数 $Re$ 的不同,可将圆管内浆体所处的区域分为层流区、过渡区和湍流区。目前,众多学者已对管内浆体的 $Re_c$ 和流动特性进行了深入研究,但主要集中于层流或湍流的研究<sup>[15-17]</sup>,而对过渡区流动的研究相对较少,且关于浆体过渡区的流动机制也暂不明晰。当浆体各质点之间不再是简单的轴线运动,开始相互作用,出现小范围扰动,此时浆体的流动状态处于过渡区<sup>[18]</sup>。这种不稳定和混乱的流动可能使管道压力提高。

收稿日期:2024-03-12;修回日期:2024-06-12;录用日期:2024-07-18

流动阻力特性是浆体进行管道运输设计的重要参数。研究发现,在一些速度范围内,浆体的流动阻力系数低于载流体的流动阻力系数<sup>[19]</sup>。Gao Penghui 等<sup>[20]</sup>发现盐溶液浆体在管内流动的阻力系数总体处于随  $Re$  的升高而降低的状态。当浆体表现出非牛顿流体特征,即剪切应力与速度梯度不再成正比,其阻力特性相较于单相流更为复杂<sup>[21]</sup>。目前,主要有 Bingham、Casson、Power Law、Herschele-Bulkley 等<sup>[22]</sup>流变模型用于描述管道中固液两相流的非牛顿流体特性。梁运涛等<sup>[23]</sup>指出利用 Bingham 流体模型来描述低速工况下混合相流体的流变特性所获得的效果较为理想。有研究表明,Herschele-Bulkley 与实验数据最为吻合,但其最大的误差也可能高达 30%<sup>[24]</sup>。目前,各模型的适用条件还未得出统一的结论。

综上所述,本文对浆体在水平圆管内的过渡区域内的流动特性进行了研究,并分析过渡区内水平圆管浆体流动特性的影响因素。本实验工况与文献<sup>[25]</sup>相类似,因此选用 Power Law 模型来描述浆体的流变特性。以期浆体输运系统应用和性能优化提供参考。

## 1 实验设计

### 1.1 实验仪器

研究浆体流动特性的影响因素对于探究固液两相流体的安全输运至关重要,为此设计了固液两相流体流动特性测量实验平台,如图 1 所示。实验平台主要由 3 部分构成:载冷剂循环系统、压降测试系统和数据采集系统。低温恒温循环水槽为整个系统提供冷量,并通过换热套管连接循环管道的进出口,以便精确控制管道内流体的温度。该水槽能够持续提供稳定的低温环境,以确保冰浆的稳定性和流动性。在整个实验过程中,数据采集系统能够实时监测和记录各种物理参数,并将这些数据传送到计算机控制系统进行分析和处理。在进行性能测试期间,储存罐内的冰浆由搅拌电机连续搅拌,以保证混合均匀。

### 1.2 实验条件和步骤

冰浆是一种典型的颗粒系统固液多相流体,冰浆在管道中流动时,冰晶颗粒会发生团聚、Ostwald 熟化、破碎等动力学行为。实际冰晶颗粒无法控制粒径大小,因此在实验中,使用了密度接近于冰晶颗粒的聚乙烯颗粒作为替代物,这样可以在理想条件下简化模型,从而将实验结果推广至更为复杂的冰浆应用中。另外使用兼具亲水和亲油特性的表面活性剂可以防止冰颗粒附着于容器壁上<sup>[26]</sup>。因此在实验中,考虑添加十二烷基硫酸钠(SDS)以确保聚乙烯颗粒均匀分散,

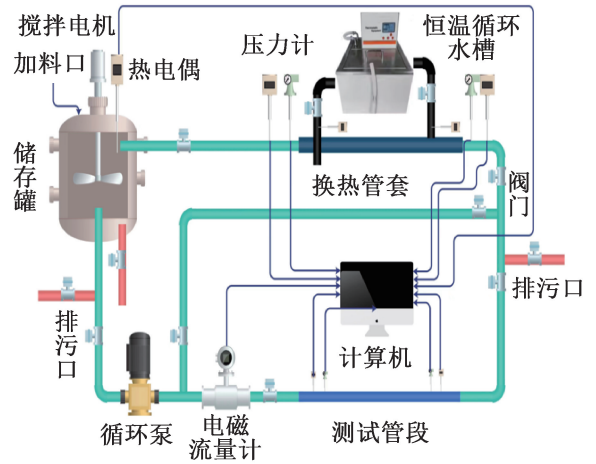


图 1 实验装置

Fig.1 The experiment device

从而有效避免颗粒的聚集和黏附问题。表 1 所示为组成浆体的聚乙烯颗粒和水溶液的热物性参数。

表 1 聚乙烯颗粒与水溶液热物性参数

Tab.1 Thermophysical properties of polyethylene particles and aqueous solutions

物质	参数	数值
水溶液	温度/ $^{\circ}\text{C}$	3
	密度/ $(\text{kg}/\text{m}^3)$	999.964
	黏度/ $(\text{mPa}\cdot\text{s})$	1.619
聚乙烯颗粒	密度/ $(\text{kg}/\text{m}^3)$	922
	粒径/ $\text{mm}$	0.3、0.4、0.5
	潜热/ $(\text{kJ}/\text{kg})$	110
	比热容/ $[\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})]$	2.4

首先将水注入储存罐并启动循环泵,确保水在环路中循环流动以清洗管道,打开排污口,将水排出。将 135 L 纯水和 SDS 注入储存罐,将转速调整至 150  $\text{r}/\text{min}$ ,液体混合均匀以制备质量分数为 0.1% 的 SDS 溶液作为实验的液相工质。下一步进行排气操作,排气完全后,称取所需质量的聚乙烯颗粒作为固相工质,并从加料口倒入储存罐中。持续搅拌 2~3 min,形成浆体溶液。通过调节流量阀,控制流速,并在可视化有机玻璃管中观察浆体的流动形态,记录流动压降的变化。实验工况如表 2 所示,更换不同粒径的聚乙烯颗粒和管道,重复上述所有步骤。在本研究中,IPF 表示浆体的固相含量,指浆体中固相颗粒的体积分数。在显微镜观察下的 3 种不同粒径的聚乙烯颗粒如图 2 所示,可以观察到聚乙烯颗粒呈现出不同的形状,大多为椭圆或近似圆形。

表2 实验工况  
Tab.2 Experimental conditions

参数	数值
固相含量 $C_v/\%$	5~20
粒径 $d/\text{mm}$	0.3, 0.4, 0.5
管径 $D/\text{mm}$	17, 24, 28
流速 $v/(\text{m/s})$	0.05~1.80

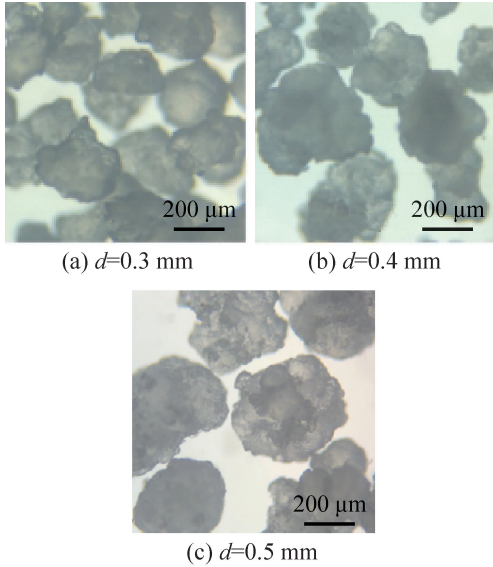


图2 聚乙烯颗粒实物

Fig.2 Physical picture of polyethylene particles

### 1.3 数据收集

浆体的表观黏度受各种因素的影响而变化<sup>[27]</sup>。因此,利用溶液的动力黏度计算浆体的  $Re$ 。A. Kit-anovski 等<sup>[28]</sup>认为固相含量不超过 62.5%时,浆体的动力黏度可用 Thomas 公式计算:

$$\mu_m = \mu_1 [1 + 2.5C_v + 10.05C_v^2 + 0.00273\exp(16.6C_v)] \quad (1)$$

式中:  $\mu_m$  为浆体的动力黏度,  $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ;  $\mu_1$  为载流体的动力黏度,  $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ;  $C_v$  为固相颗粒的体积分数, %。

浆体密度:

$$\rho_m = \rho_l(1 - C_m) + \rho_s C_m \quad (2)$$

式中:  $\rho_m$  为浆体密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $\rho_l$  为载流体密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $\rho_s$  为固相颗粒密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $C_m$  为固相颗粒质量分数, %。

雷诺数:

$$Re = \rho_m v D / \mu_m \quad (3)$$

式中:  $Re$  为浆体雷诺数;  $v$  为浆体速度,  $\text{m}/\text{s}$ ;  $D$  为管道内径,  $\text{m}$ 。

临界雷诺数  $Re_c$  是指在流体力学中描述流动过程的一个无量纲数,定义了层流和湍流之间的过

渡<sup>[29]</sup>。普通圆管中由压差驱动的液体流动,从层流到湍流的  $Re_c$  在 1 800~2 300<sup>[30]</sup>。而浆体的  $Re_c$  多由观察其流动形态获得,因此并不是一个准确值。本实验通过改变流量使流态发生变化,观察到浆体在圆管中流动时的层流、湍流及其过渡过程。浆体在管内流动摩擦阻力系数  $\lambda$  由式(4)计算。牛顿流体在层流和湍流状态下的摩擦阻力系数 ( $\lambda_{\text{lam}}$  和  $\lambda_{\text{tur}}$ ) 分别通过式(5)和式(6)获得。

$$\lambda = \frac{2D\Delta p}{\rho_m L v^2} \quad (4)$$

$$\lambda_{\text{lam}} = 64/Re \quad (5)$$

$$\lambda_{\text{tur}} = 0.3164/Re^{0.25} \quad (6)$$

式中:  $\lambda$  为阻力系数;  $\Delta p$  为压降,  $\text{Pa}$ ;  $L$  为测试管段的长度,  $\text{m}$ 。

在水平管道内,浆体流动的壁面剪切应力  $\tau$  和剪切速率  $\gamma$  关系式分别如下:

$$\tau = \frac{D\Delta p}{4L} \quad (7)$$

$$\gamma = 8v/D \quad (8)$$

### 1.4 实验台验证及误差分析

实验选用纯水流动,验证单相流体在管内的流动特性,通过载冷剂循环系统将水溶液控制在 3 °C,记录不同  $Re$  条件下,纯水在水平管内的流动压降,与理论压降值的对比如图 3 所示。由图 3 可知,理论压降曲线与实验之间的吻合度较高,最大相对偏差为 5.40%,表明实验装置设计合理,且实验操作的准确性得到了保证。

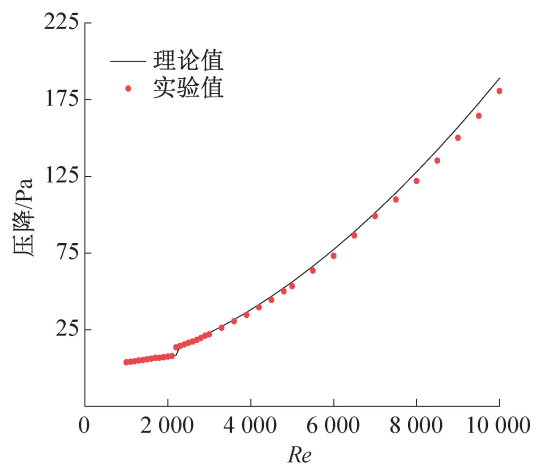


图3 压降的实验值与理论值对比结果

Fig.3 Comparison of experimental and theoretical values of pressure drop

通过对实验误差的分析和控制可以更好地评估实验结果的可靠性,并提高实验的准确性和可重复性,间接测量量相对误差汇总如表 3 所示。

表 3 相对误差汇总

Tab.3 Summary of relative errors

间接测量量	相对误差/%
浆体密度 $\rho_m$	0.001
浆体动力黏度 $\mu_m$	0.001
浆体雷诺数 $Re$	0.51
流速 $v$	0.51
阻力系数 $\lambda$	0.51

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 流动形态与临界雷诺数的关系

在浆体中,颗粒与流体之间的相互作用会影响流动形态。在不同 IPF 和不同粒径下,其对应的临界雷诺数  $Re_c$  可能会有所不同。如果需要稳定和安全的操作条件,则必须避免静止床或流化床的流动形态。根据浆体在不同 IPF 和粒径下的流动形态下,绘制了如图 4 所示的柱状图。由图 4 可知,浆体在管道中从静止床逐渐过渡至悬浮床时,其对应的  $Re_c$  增加。这是由于 IPF 增加使颗粒之间相互作用加强,颗粒聚集或形成非均质悬浮床。

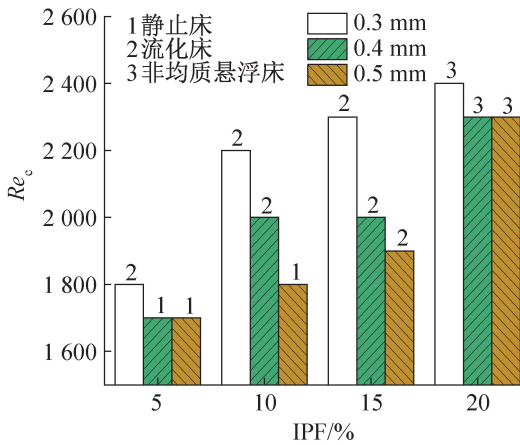


图 4 流动形态与临界雷诺数的关系

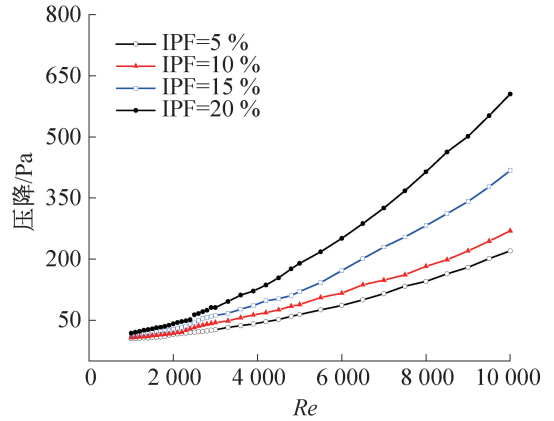
Fig.4 Relationship between flow pattern and critical Reynolds number

### 2.2 各参数对过渡区流动特性的影响分析

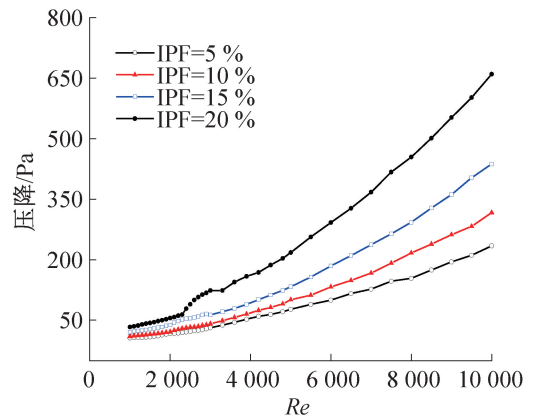
#### 2.2.1 固相含量的影响

为了研究浆体的固相含量对过渡区流动特性的影响,对不同固相含量的浆体流过管径为 28 mm 的水平直管进行一系列实验,压降随雷诺数  $Re$  的变化如图 5 所示。由图 5 可知:1)随着 IPF 和  $Re$  的增加,浆体流动过程中的压降也逐渐增加。2)在层流区域内,压降增长速率缓慢,而在湍流区域内增长速率明显增加。在过渡区域内,增长速率出现不稳定。这是

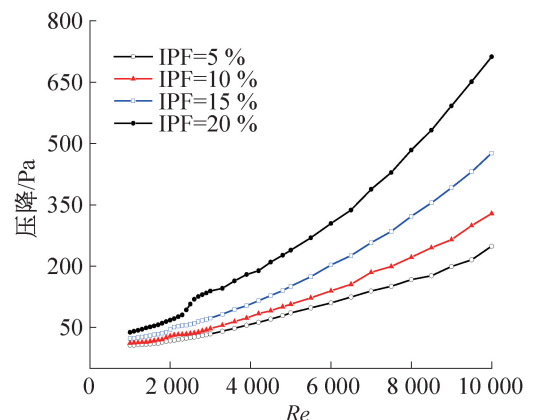
由于浆体逐渐从层流向湍流转变。当浆体转变为湍流时,层流的稳定性丧失,导致压降迅速增加。3)随着 IPF 的减小,浆体从层流转变为湍流的  $Re_c$  越小,过渡区的范围也逐渐减小,直至不能被明显地观察到。在降低流动阻力的前提下,应通过减小 IPF 以减小过渡区范围,以确保固液两相混合浆体运输过程中的稳定性和效率。



(a)  $d=0.3$  mm



(b)  $d=0.4$  mm



(c)  $d=0.5$  mm

图 5 不同固相含量下压降与雷诺数的关系

Fig.5 Relationship between pressure drop and Reynolds number at different IPF

### 2.2.2 粒径和管径的影响

图 6 所示为颗粒粒径不同的浆体在固相含量不同时压降随  $Re$  的变化。在粒径为 0.3 mm 时, 流态转变的  $Re_c$  范围为 1 800~2 400; 而在粒径为 0.4 mm 和 0.5 mm 时,  $Re_c$  的范围均为 1 700~2 300。上述结果表明, 随着颗粒粒径的增加, 浆体的  $Re_c$  逐渐减小。由图 6(b) 可知, 较小的颗粒粒径有助于缩小过渡区的范围, 这在某种程度上降低了浆体的混乱程度, 从而使浆体的流动性质得到显著增强。

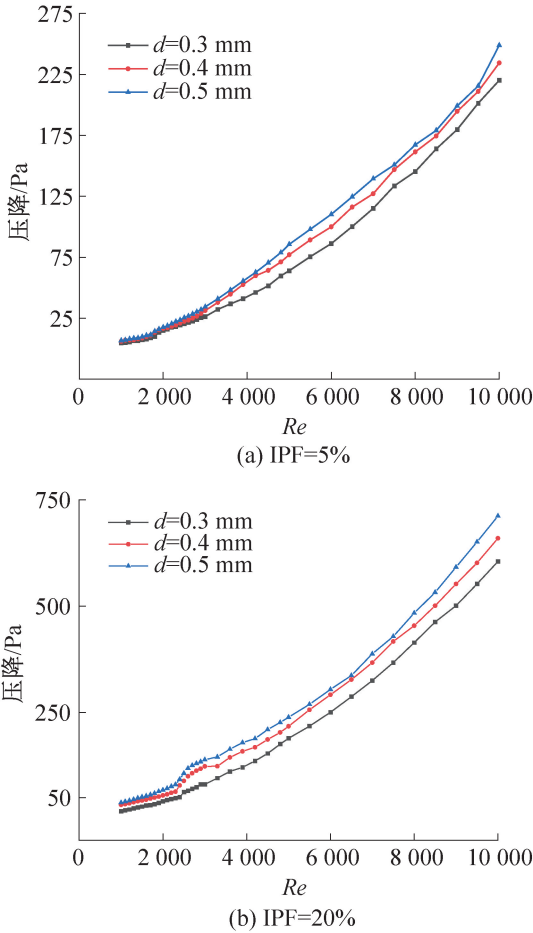


图 6 不同粒径下压降与雷诺数的关系  
Fig.6 Relationship between pressure drop and  $Re$  at different particle sizes

不同管径下压降随雷诺数  $Re$  的变化如图 7 所示。当管径为 17 mm 时, 流态转变的  $Re_c$  范围为 2 100~2 600; 管径为 24 mm 时,  $Re_c$  的范围为 2 000~2 500; 管径为 28 mm 时,  $Re_c$  的范围为 1 700~2 400。相较于粒径对  $Re_c$  的影响, 浆体流态转变的  $Re_c$  受管径的影响更为显著。在 IPF 一定的情况下, 随着管径的逐渐减小, 压降逐渐增大, 且管径越小, 压降增幅越大。这是因为较小的管径限制了流体的流动空间, 增加了摩擦力, 使流体更容易进入湍流状态, 导致流态从层流向湍流的过渡“提前”。

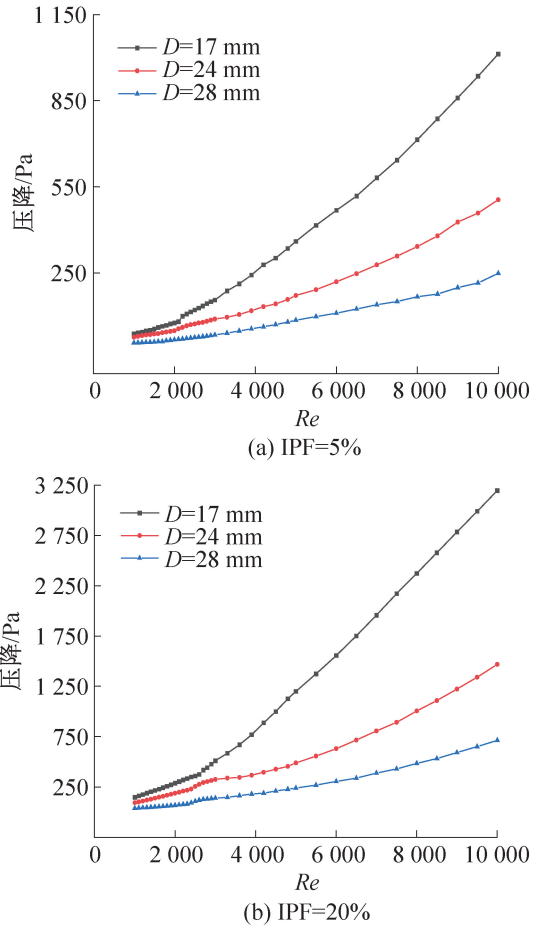


图 7 不同管径下压降与雷诺数的关系  
Fig.7 Relationship between pressure drop and  $Re$  under different pipe diameters

### 2.3 流动阻力系数的分析

阻力是固液两相流中最重要之力之一, 为了描述浆体的流动阻力特性, 使用摩擦阻力系数来评估流动性能。相关参数参考前文公式。

图 8 所示为不同管径条件下, 浆体在水平管道内流动的摩擦阻力系数随雷诺数  $Re$  的变化。由图 8 可知, 随着  $Re$  的增加, 阻力系数  $\lambda$  随  $Re$  的增加整体呈降低趋势。在层流区域内, 浆体流动呈现出固液两相分层流的特征, 浮力相较于惯性力更为显著, 更多的颗粒悬浮在管道上部, 颗粒与上壁面碰撞频繁, 故而浆体的阻力系数明显高于牛顿流体。在湍流区域内, 浆体中的颗粒更容易分散和均匀分布, 使浆体的流动特性更接近于牛顿流体。在过渡区域内, 随着  $Re$  的增加, 浆体流动逐渐从层流向湍流过渡。在这个过渡过程中, 流动结构发生变化, 颗粒分布和流体运动方式发生转变, 导致阻力系数出现先增大后减小的变化趋势。这种不稳定的变化反映了浆体流动特性在过渡区域内的复杂性。

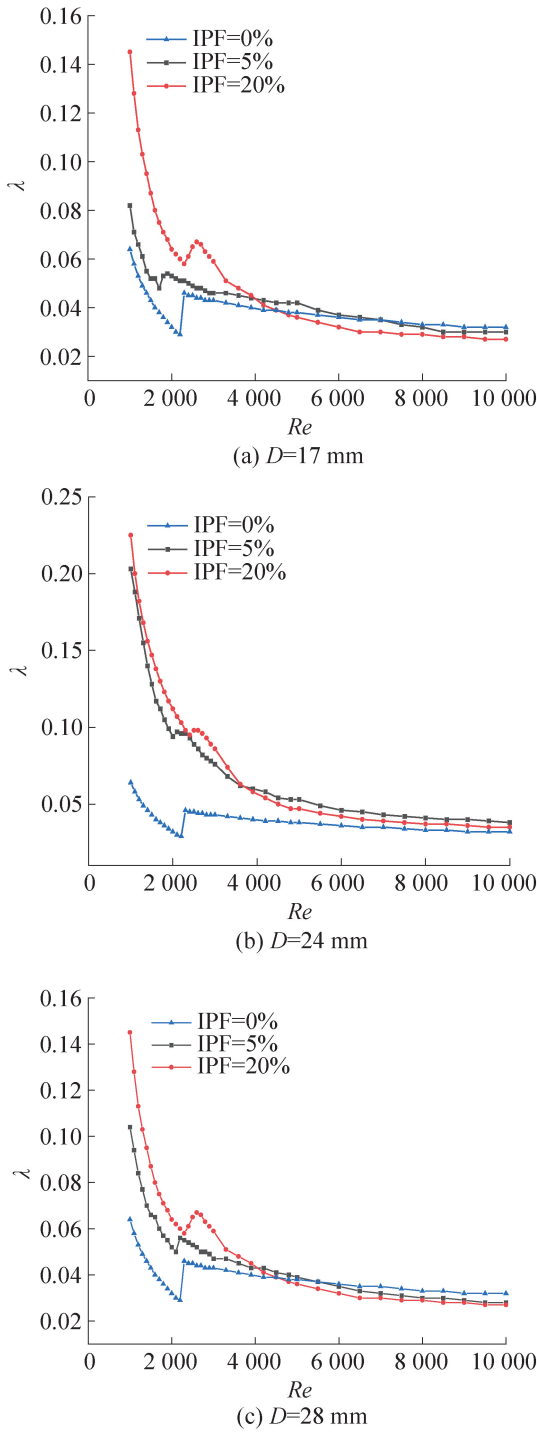


图8 不同管径下阻力系数与雷诺数的关系

Fig.8 Relation between drag coefficient and Reynolds number under different pipe diameters

## 2.4 流变模型

分析阻力系数的变化趋势后发现,无法将浆体作为牛顿流体去分析其流动特性。因此,需要采用适当的非牛顿模型来更准确地描述浆体的流动特性。本文将浆体视为拟塑性流体,拟采用 Power Law 模型来描述浆体的流动特性:

$$\tau_w = K_p \gamma^{n_p} \quad (9)$$

式中:  $\tau_w$  为壁面剪切应力, Pa;  $\gamma$  为壁面剪切速率,  $s^{-1}$ ;  $n_p$  为流变指数(当  $n > 1$  时,浆体呈现出剪切增稠的状态,属于胀塑性流体;当  $n = 1$  时,浆体为牛顿流体;当  $n < 1$  时,浆体呈现出剪切变稀的状态,属于假塑性流体。);  $K_p$  为稠度系数,  $mm^2/s$ 。

浆体的流变特性通常可以根据剪切应力与剪切速率的关系来判断。利用式(7)和式(8),得到如图9所示的关系。表4所示为浆体在不同 IPF 及颗粒粒径条件下, Power Law 模拟拟合得到的流变方程。

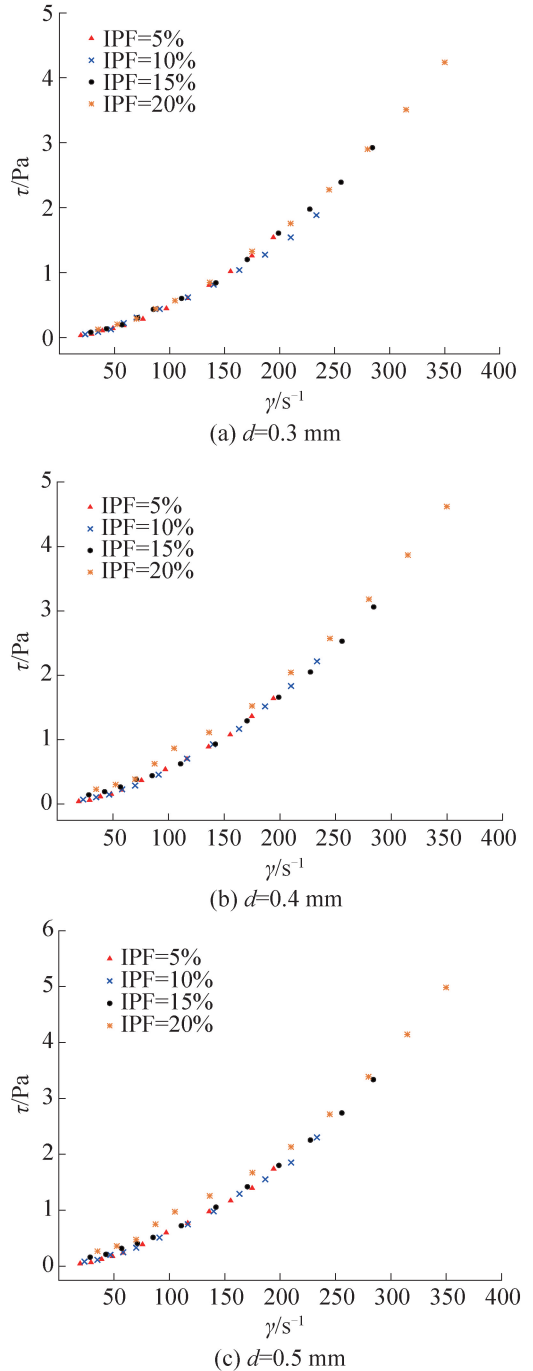


图9 剪切应力与剪切速率的关系

Fig.9 Relationship between shear stress and shear rate

结果表明,模型对浆体的流变特性拟合相关性很高,均在 0.99 以上。

表 4 浆体在不同固相含量及粒径时的流变方程

Tab.4 Rheological equation of slurry with different IPF and particle size

粒径/mm	IPF/%	流变方程	相关性
0.3	5	$\tau = 1.29195 \times 10^{-4} \gamma^{1.77969}$	0.999
	10	$\tau = 3.34981 \times 10^{-4} \gamma^{1.5801}$	0.998
	15	$\tau = 2.12344 \times 10^{-4} \gamma^{1.68481}$	0.997
	20	$\tau = 2.20831 \times 10^{-4} \gamma^{1.68253}$	0.999
0.4	5	$\tau = 2.75332 \times 10^{-4} \gamma^{1.64723}$	0.998
	10	$\tau = 2.33645 \times 10^{-4} \gamma^{1.67799}$	0.999
	15	$\tau = 2.97424 \times 10^{-4} \gamma^{1.63229}$	0.997
	20	$\tau = 6.49779 \times 10^{-4} \gamma^{1.51087}$	0.997
0.5	5	$\tau = 3.92671 \times 10^{-4} \gamma^{1.58967}$	0.998
	10	$\tau = 3.78908 \times 10^{-4} \gamma^{1.59373}$	0.998
	15	$\tau = 4.05203 \times 10^{-4} \gamma^{1.59196}$	0.997
	20	$\tau = 8.33491 \times 10^{-4} \gamma^{1.47933}$	0.994

### 3 结论

本文通过实验观察了浆体在管道中的流动形态,重点分析了临界雷诺数,用压降、阻力系数和流变模型来描述冰浆类浆体的流动特性。研究不同固相含量、颗粒粒径和管径对过渡区内浆体流动特性的影响,得到如下结论:

1) 从层流向湍流过渡的  $Re_c$  并不是常数,在不同固相含量(5%~20%)、颗粒粒径(0.3、0.4、0.5 mm)和管径(17、24、28 mm)的情况下,浆体流态转变的  $Re_c$  介于 1 700~2 600。

2) 浆体流动压降对参数的灵敏程度为:管径>固相含量>颗粒粒径。在高  $Re$  状态下,固相含量对压降影响更显著。浆体的实际应用应尽可能缩短过渡区,以确保实现系统的最佳经济运行工况。

3) 随着  $Re$  的增加,过渡区内浆体的阻力系数整体上呈先增大后减小的趋势。同时发现在大管径内,浆体混合更均匀,从而摩擦阻力系数更接近于单相牛顿流体。

4) 使用 Power Law 模型对浆体的流变特性拟合,相关性均在 0.99 以上。

本文受苏州市科技发展计划项目(SNG2020054)和江苏省研究生科研与实践创新计划项目(SJCX23\_1726)资助。

(The project was supported by Suzhou Science and Technology Development Plan Project (No. SNG2020054) and Postgraduate Research and Practice Innovation Project in Jiangsu Province (No. SJCX23\_1726).)

### 参考文献

- [1] 朱桂华,洪泽玉,阮利超,等. 水平 90°弯管内盐泥浆输送压力损失研究[J]. 纯碱工业, 2023(1): 11-15. (ZHU Guihua, HONG Zeyu, RUAN Lichao, et al. Study on pressure loss of salt sludge conveying in horizontal 90° elbow[J]. Soda Industry, 2023(1): 11-15.)
- [2] 吕彤,胡琼,肖红,等. U形弯管内大颗粒固液两相流的输送特性研究[J]. 矿冶工程, 2019, 39(4): 6-10. (LYU Tong, HU Qiong, XIAO Hong, et al. Transport characteristics of large particles in U-shaped pipe [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2019, 39(4): 6-10.)
- [3] CAO Xuewen, YANG Kairan, BIAN Jiang. Investigation of CO<sub>2</sub> hydrate slurry flow characteristics with particle dissociation for carbon storage and transportation [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2021, 152: 427-440.
- [4] CALATI M, RIGHETTI G, ZILIO C, et al. CFD analyses for the development of an innovative latent thermal energy storage for food transportation[J]. International Journal of Thermofluids, 2023, 17: 100301.
- [5] NTZIMANI A, ANGELAKOPOULOS R, SEMENOGLOU I, et al. Slurry ice as an alternative cooling medium for fish harvesting and transportation: study of the effect on seabass flesh quality and shelf life[J]. Aquaculture and Fisheries, 2023, 8(4): 385-392.
- [6] MINETTO S, FABRIS F, MARINETTI S, et al. A review on present and forthcoming opportunities with natural working fluids in transport refrigeration[J]. International Journal of Refrigeration, 2023, 152: 343-355.
- [7] 杜群,宋文吉,肖睿,等. 基于冰浆机与砖冰机结合的制冰方法及能耗研究[J]. 低温与超导, 2021, 49(12): 78-84. (DU Qun, SONG Wenji, XIAO Rui, et al. Research on ice making method and energy consumption based on the combination of ice mortar machine and brick ice machine[J]. Cryogenics & Superconductivity, 2021, 49(12): 78-84.)
- [8] 刘圣春,宋明,代宝民,等. 管道内冰浆流动压降特性模拟和实验研究[J]. 制冷学报, 2018, 39(2): 61-67. (LIU Shengchun, SONG Ming, DAI Baomin, et al. Numerical simulation and experimental study on flow pressure drop of ice slurry in piping systems[J]. Journal of Refrigeration, 2018, 39(2): 61-67.)
- [9] 李伯,张红霞,莫伟南. 弯管内减阻流体参数沿程变化

- 模拟分析[J]. 中国科技论文, 2019, 14(10): 1105-1110. (LI Bo, ZHANG Hongxia, MO Weinan. Simulation analysis of the variation of drag reduction fluid parameters along the curved pipe way[J]. China Sciencepaper, 2019, 14(10): 1105-1110.)
- [10] KUMAR B, MITTAL S. Prediction of the critical Reynolds number for flow past a circular cylinder[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2006, 195(44-47): 6046-6058.
- [11] LI F C, WANG D Z, KAWAGUCHI Y, et al. Simultaneous measurements of velocity and temperature fluctuations in thermal boundary layer in a drag-reducing surfactant solution flow[J]. Experiments in Fluids, 2004, 36(1): 131-140.
- [12] 闫雪, 张万松, 邓佑鲜, 等. 垂直立管中下行颗粒流的雷诺数[J]. 中国粉体技术, 2014, 20(6): 14-16. (YAN Xue, ZHANG Wansong, DENG Youxian, et al. Reynolds number of granular flow in standpipe[J]. China Powder Science and Technology, 2014, 20(6): 14-16.)
- [13] CAI Shupeng, HIGUCHI Y. Drag-reduction behavior of an unusual nonionic surfactant in a circular pipe turbulent flow[J]. Journal of Hydrodynamics, 2014, 26(3): 400-405.
- [14] 田兴旺, 张琨, 王平, 等. 颗粒堆积多孔介质内幂律流体流动阻力模型[J]. 热科学与技术, 2021, 20(2): 148-156. (TIAN Xingwang, ZHANG Kun, WANG Ping, et al. Flow resistance model of power law fluid flow through granular porous medium with wall effect[J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2021, 20(2): 148-156.)
- [15] REZAEI M, ALI PAKRAVAN H. Thermo-fluidic characteristics of ice slurry flows in U-bend pipes for cold thermal energy storage[J]. Journal of Energy Storage, 2023, 57: 106224.
- [16] MI Sha, CAI Lingling, LUO Chun. Analysis on flow resistance of two-phase ice slurry in pulsating flow[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2022, 186: 485-496.
- [17] MELLARI S. Experimental investigation and modeling of the pressure drop of ice slurry flow in horizontal pipe[J]. International Journal of Refrigeration, 2023, 147: 134-142.
- [18] IONESCU C, HABERSCHILL P, KISS I, et al. Local and global heat transfer coefficients of a stabilised ice slurry in laminar and transitional flows[J]. International Journal of Refrigeration, 2007, 30(6): 970-977.
- [19] NIEZGODA-ŻELASKO B, ZALEWSKI W. Momentum transfer of ice slurry flows in tubes, experimental investigations[J]. International Journal of Refrigeration, 2006, 29(3): 418-428.
- [20] GAO Penghui, LI Zhiyong, YAN Fuchun, et al. Study on flow and heat transfer characteristics of salt solution ice slurry[J]. International Journal of Refrigeration, 2024, 159: 1-16.
- [21] RAYHAN F A, YANUAR, PAMITRAN A S. Effect of ice mass fraction on ice slurry flow for cold energy storage application[J]. Energy Reports, 2020, 6: 790-794.
- [22] 唐道轲, 付林, 杨波, 等. 大管径管道冰浆流动阻力特性实验研究[J]. 暖通空调, 2023, 53(10): 115-119. (TANG Daoke, FU Lin, YANG Bo, et al. Experimental study on flow resistance characteristics of ice slurry in pipelines with large diameter[J]. Journal of HV & AC, 2023, 53(10): 115-119.)
- [23] 梁运涛, 王树刚, 张腾飞, 等. 水平管道内冰浆流动阻力特性预测模型及比较[J]. 土木建筑与环境工程, 2012, 34(6): 152-156. (LIANG Yuntao, WANG Shugang, ZHANG Tengfei, et al. Numerical modeling of ice slurry flow pressure drop in horizontal pipes[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2012, 34(6): 152-156.)
- [24] MONTEIRO A C S, BANSAL P K. Pressure drop characteristics and rheological modeling of ice slurry flow in pipes[J]. International Journal of Refrigeration, 2010, 33(8): 1523-1532.
- [25] MELLARI S. Experimental investigations of ice slurry flows in horizontal pipe based on monopropylene glycol[J]. International Journal of Refrigeration, 2016, 65: 27-41.
- [26] 唐恒, 章学来, 王海民. 基于冰晶结构的二元冰蓄冷系统中添加剂的研究[J]. 制冷空调与电力机械, 2005, 26(1): 33-35. (TANG Heng, ZHANG Xuelai, WANG Haimin. Study on the additive in binary ice thermal storage system based on the structure of ice crystal[J]. Refrigeration Air Conditioning and Electric Power Machinery, 2005, 26(1): 33-35.)
- [27] MORIMOTO T, KOMATSU W, KIMATA H, et al. Solidification behavior of an ice slurry flowing in a rectangular channel[J]. International Journal of Refrigeration, 2021, 131: 129-136.
- [28] KITANOVSKI A, POREDOŠ A. Concentration distribution and viscosity of ice-slurry in heterogeneous flow[J]. International Journal of Refrigeration, 2002, 25(6): 827-835.
- [29] ETEMAD S G, SADEGHI M. Non-Newtonian pressure drop and critical Reynolds number through rectangular duct[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2001, 28(4): 555-563.
- [30] 付朝波, 宋鹏云. 非接触机械密封端面间流体膜流动状态临界雷诺数的讨论[J]. 润滑与密封, 2019, (下转第121页)

- [17] 贾欣. 海水源热泵多井取水系统渗流换热特性研究 [D]. 大连:大连理工大学, 2018. (JIA Xin. Study on seepage and heat transfer of multi-well infiltration intake system for seawater source heat pump[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018.)
- [18] 周丹坤, 李晓昭, 常晓军. COMSOL 平台在城市地下多种资源相互影响分析中的应用[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2021, 51(2): 526-532. (ZHOU Dankun, LI Xiaozhao, CHANG Xiaojun. Application of COMSOL platform in analysis of interaction of urban underground multiple resources[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2021, 51(2): 526-532.)
- [19] 张彬, 李卫明, 封帆, 等. 基于 COMSOL 的地下水封油库岩固流固耦合特征模拟研究[J]. 工程地质学报, 2012, 20(5): 789-795. (ZHANG Bin, LI Weiming, FENG Fan, et al. Numerical simulation for fluid-solid coupling characteristics in surrounding rock of underground

water-sealed oil storage based[J]. Journal of Engineering Geology, 2012, 20(5): 789-795.)

- [20] JIA Xin, DUANMU Lin. Performance study on the seepage and heat transfer in a bench-scale multi-well infiltration intake system for seawater source heat pump [J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2022, 52: 102268.

#### 通信作者简介

贾欣, 女, 博士, 副教授, 大连大学建筑工程学院, 13390004838, E-mail: jiaxin851018@163.com。研究方向: 热泵及可再生能源在建筑中的利用。

#### About the corresponding author

Jia Xin, female, Ph. D., associate professor, College of Civil Engineering and Architecture, Dalian University, 86-13390004838, E-mail: jiaxin851018@163.com. Research fields: heat pump and the application of renewable energy in buildings.

(上接第 113 页)

44(7): 63-68. (FU Chaobo, SONG Pengyun. Discussion on critical Reynolds number of fluid film flow state between the non-contact mechanical seal faces[J]. Lubrication Engineering, 2019, 44(7): 63-68.)

#### 通信作者简介

王晓春, 男, 博士, 苏州科技大学环境科学与工程学院,

18505127962, E-mail: sprdawn@163.com。研究方向: 冰浆流动特性。

#### About the corresponding author

Wang Xiaochun, male, Ph. D., School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, 86-18505127962, E-mail: sprdawn@163.com. Research fields: flow characteristics of ice slurry.