

壁面滑移条件下水煤浆的流动阻力和减阻特性

陈良勇, 段钰锋, 刘猛, 赵长遂

(东南大学热能工程研究所, 江苏省 南京市 210096)

Flow Resistance and Drag-reduction Properties of Coal Water Slurries in Pipe Flow With the Presence of Wall Slip

CHEN Liang-yong, DUAN Yu-feng, LIU Meng, ZHAO Chang-sui

(Institute of Thermal Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu Province, China)

ABSTRACT: Experimental study was carried out on a pilot-scale slurry transportation apparatus to determine flow resistances of coal water slurries (CWS) in pipes. Based on the analysis of wall-slip behaviors and rheological properties, three flow regimes were put forward to describe the pipe flow of the test slurries. The effects of these factors (solid concentration, slurry temperature, coal particle size, pipe diameter and the flow regime) on flow resistance properties and drag reduction were investigated. The results suggested that when these factors changed, the flow resistance were varied by changing wall-slip behavior and rheological properties of coal water slurries. The effects of these factors on friction factor and drag reduction were closely related to the flow regime. If those pipe flows with different solid concentration, temperature or coal particle sizes belong to the same flow regime, the trends of change in drag reduction with flow velocity would keep similarity.

KEY WORDS: coal water slurry; rheological property; wall slip; flow resistance properties; drag reduction

摘要: 在中试规模的浆体输送装置上进行水煤浆直管流动阻力试验, 在壁面滑移特性和流变特性分析的基础上, 将水煤浆管内流动划分为3种形态, 并重点研究了浓度、温度、煤粉粒径、管径和流动形态对流动阻力特性和减阻特性的影响。结果表明: 当各因素变化时, 流动阻力的变化通过改变流变特性和壁面流动条件实现; 各因素对摩擦阻力系数和减阻率的影响规律取决于浆体所处的流动形态; 在同一流动形态范围内, 不同的浓度、温度、煤粉粒径或管径下, 滑移减阻率随流速的变化规律具有相似性。

关键词: 水煤浆; 流变特性; 壁面滑移; 阻力特性; 减阻

基金项目: 国家重点基础研究发展计划基金项目(2004CB217701, 2010CB227001)。

Project Subsidized by the Special Funds for Major State Basic Research Projects of China(2004CB217701, 2010CB227001).

0 引言

水煤浆(coal water slurries, CWS)是由煤粉、水和少量添加剂混合构成的液固两相煤基流体燃料, 在水煤浆燃烧技术和煤气化技术等洁净煤技术领域应用广泛^[1-2]。水煤浆的管道输送技术是水煤浆燃烧和煤气化这2类总体技术的重要组成部分之一。精确确定水煤浆的管内流动阻力及其变化规律对管道设计、泵送动力的选择和设备高效运行具有十分重要的意义。

水煤浆通常被看作液固均匀混合的单相流体, 但流动阻力特性的研究十分困难, 主要是因为浆体的流变特性复杂多样, 几乎涵盖了各种类型的非牛顿流体^[3-5]。在水煤浆流动过程中通常会产生壁面滑移现象^[6-9], 主要是由于静态壁面损耗效应或壁面剪切作用下的颗粒迁移效应导致管道壁面上形成一层黏度较低、具有润滑作用的“液体层”(滑移层), 从而使浆体与壁面间产生相对运动^[10-11]。此时, 管道阻力损失不但取决于浆体内部的能量损失, 而且与壁面上的流动条件密切相关。

随着水煤浆这类非牛顿流体的大规模利用和输送效率指标的提高, 输送减阻问题日益受到重视。文献[12-13]报道了空气/润滑脂两相混合物在壁面滑移条件下的流动阻力试验结果。文献[14-15]研究了壁面滑移条件下宾汉流体和幂率流体的阻力特性。徐桂云等^[16]在润滑脂(屈服-幂率流体)的管内流动结构分析基础上, 采用量纲分析法和近似解法确定了壁面滑移条件下的阻力计算公式。卢平等^[17-18]研究了煤水混合物的管内流动阻力, 提出用包含壁面滑移因素和流变特性的广义雷诺数来计算摩擦阻

力系数。文献[7]考察了多种管道材料对水煤浆流动阻力的影响,发现在聚氯乙烯管中具有较大的壁面滑移速度,从而使聚氯乙烯管内的流动阻力相对于钢管降低幅度达到45%。对水煤浆这类液固两相非牛顿流体的最新研究表明^[9,19-21],浓度较高时,浆体本身呈现显著的非牛顿流体特征,同时壁面上的滑移流动条件随浓度、温度、固相粒径和壁面剪切等因素变化较大。因此,水煤浆流动与牛顿流体和一般非牛顿流体流动存在根本的差别,它兼具了单相流体和液固两相流体的流动特征。

基于以上考虑,本文在中试规模的水煤浆输送装置上研究水煤浆管内的流动阻力特性,在壁面滑移特性和流变特性分析的基础上,提出了流动形态的概念,进而研究浓度、温度、煤粉粒径和管径对流动阻力特性和滑移减阻特性的影响,确立了各因素的影响规律与流动形态的关系,为管道的设计和运行参数的优化提供参考。

1 试验装置及方法

1.1 试验装置

试验装置构成如图1所示。试验中,煤浆储罐中的浆体由螺杆泵送入循环回路,经测量段和电磁流量计后送回储罐中循环使用。循环回路中的流量调节通过改变螺杆泵的转速和旁路流量实现,最大流量为 $16\text{ m}^3/\text{h}$ 。试验测量段为普通钢管,采用直径分别为25、32、40和50 mm。压降和流量用隔膜差压计和电磁流量计测量,精度为 $\pm 1\%$,两信号均送入数字采集系统存储。循环回路的末段设有冷却面,可通过改变冷却水量调节和稳定系统内的浆体温度,使实际值与设定值偏差 $\leq \pm 1^\circ\text{C}$ 。

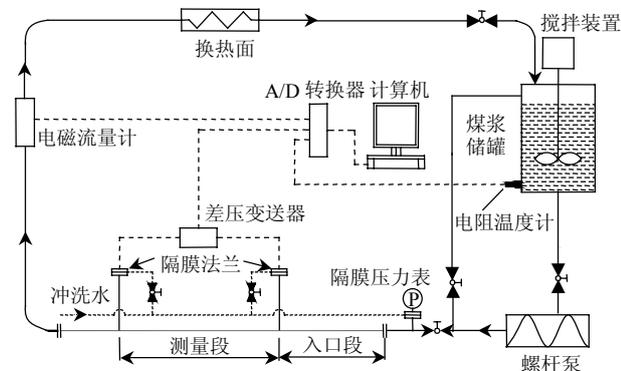


图1 水煤浆输送装置

Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

1.2 试验物料及试验工况

试验水煤浆由煤粉、水和添加剂(由某水煤浆工

程技术研究中心添加剂研究所提供,属阴离子型表面活性剂)在煤浆储罐中按一定质量比混合并经过搅拌制成。所用煤粉为神华煤,添加剂与煤粉的质量比为0.6%。煤浆制作遵循如下程序:先将水称量后加入储罐,再将添加剂加入搅拌至完全溶解,而后再将经过称量的煤粉加入并用搅拌装置搅拌1h,最后将制成的煤浆在储罐中静止放置12h。测量前,对储罐中的浆体搅拌20min以保证均匀性。测量中,浆体始终保持搅拌状态;多次取样进行体积分数测量,保证偏差 $\leq \pm 0.15\%$ 。

为考察浓度和温度的影响,采用煤粉平均粒径为 $134.5\ \mu\text{m}$ 的浆体进行流动特性试验。试验在6种浓度下($\varphi=41.7\%, 47.2\%, 49.5\%, 51.7\%, 53.8\%, 55.1\%$)进行,并在20、32、43和 52°C 下对浓度为49.5%、51.7%和53.8%的浆体进行流动特性测量。工况参数(包括煤粉平均粒径 d_p 、煤粉的真密度 ρ_p 、煤粉的最大填充份额 φ_m 及浆体体积分数 φ 等)见表1,其中 d_p 采用激光粒度分析仪L2000测定, φ_m 和 ρ_p 分别采用沉降法^[20]和比重瓶法测定。

表1 试验工况参数(浓度和温度的影响)

Tab. 1 Operating conditions (effects of temperature and concentration)

$t/^\circ\text{C}$	$d_p/\mu\text{m}$	ρ_p	$\varphi_m/\%$	$\varphi/\%$	φ/φ_m
20	134.5	1.465	57.2	41.7	0.730
20	134.5	1.465	57.2	47.2	0.826
20,32,43,52	134.5	1.465	57.2	49.5	0.865
20,32,43,52	134.5	1.465	57.2	51.7	0.904
20,32,43,52	134.5	1.465	57.2	53.8	0.940
20	134.5	1.465	57.2	55.1	0.963

为考察煤粉粒度的影响,还对煤粉平均粒径为 36.9 和 $538.6\ \mu\text{m}$ 的2种浆体进行了试验。所用煤粉的粒径分布示于图2。由于试验条件与本文相似(浓度除外),本文将文献[22]中水煤膏(coal water paste, CWP)的试验数据进行了比较分析,其煤粉平均粒径为 $1079\ \mu\text{m}$ 。水煤膏与水煤浆的工况参数见表2。

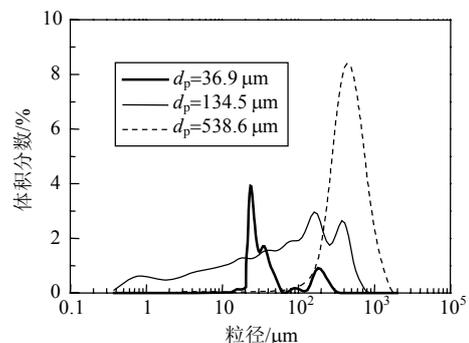


图2 煤粉粒径分布

Fig. 2 Size distribution of the coal particles

表 2 试验工况参数(煤粉粒度的影响)

Tab. 2 Operating conditions(effects of coal particle size)

$t/^\circ\text{C}$	$d_p/\mu\text{m}$	ρ_p	$\phi_m/\%$	$\phi/\%$	ϕ/ϕ_m
20	36.9	1.465	54.3	51.7	0.953
20	134.5	1.465	57.2	51.7	0.904
20	538.6	1.465	59.7	51.7	0.866
20	1 079 ^[22]	1.486 ^[22]	74.2 ^[22]	63.8 ^[22]	0.861 ^[22]

2 结果与讨论

2.1 水煤浆管内流动形态

试验结果显示，多数浆体在不同管径下的表观流变特性曲线即 τ_w-8v/D 曲线(其中 v 为平均流速， D 为管径， τ_w 为壁面剪切应力)不完全重合，表明浆体流动存在壁面滑移现象^[19,22]。此时，要确定流动阻力特性和减阻特性必须由不同管径下的 τ_w-8v/D 曲线给出壁面滑移速度和真实流变特性，本文采用 Tikhonov 正则化方法获得，详见文献[9]。

壁面滑移速度与壁面剪切应力之间的关系描述如下：

$$u_s = a(\tau_w - \tau_{wc})^b \quad (1)$$

式中： u_s 为壁面滑移速度，是壁面上的浆体与壁面之间的相对速度； a 、 b 为模型参数； τ_{wc} 为临界壁面剪切应力，是产生壁面滑移现象对应的最小壁面

剪切应力。表 3 中列出了壁面滑移速度的拟合式。壁面流动条件可分为 3 类：无滑移条件； u_s 随 τ_w 线性增加($b=1$)； u_s 随 τ_w 加速增加($b>1$)。后 2 种壁面流动条件分别对应着 2 种壁面滑移流动机制，即壁面滑移层的形成动力分别来自壁面静态损耗效应和壁面剪切导致的颗粒迁移效应^[9]。

真实流变特性可用屈服-幂率模型描述：

$$\tau = \tau_y + K\dot{\gamma}^n \quad (2)$$

式中： τ 和 τ_y 分别为剪切应力和屈服应力； K 为稠度系数； n 为流变特性指数； $\dot{\gamma}$ 为真实剪切速率。当 $n=1$ 时，为宾汉流体；当 $n=1$ 且 $\tau_y=0$ 时，为牛顿流体。试验浆体的真实流变特性见表 4。

综合分析表 3、4 并结合壁面滑移流动机制发现，在浆体的流变特性和壁面流动条件之间存在一定的耦合关系，按照这种耦合关系，管内流动可分为 3 种形态：

- 1) 牛顿流体的壁面无滑移流动。基本特征：① ϕ/ϕ_m 较小($\phi/\phi_m < 0.8$)，浆体为黏度较低的牛顿流体；② 管道壁面上为无滑移条件。如工况 $d_p = 134.5 \mu\text{m}$ ， $\phi = 41.7\%$ ， $t = 20^\circ\text{C}$ 。
- 2) 不显著的非牛顿流体的壁面滑移流动。基本特征：① ϕ/ϕ_m 处于中等范围($0.8 < \phi/\phi_m < 0.9$)，浆

表 3 水煤浆/水煤膏的壁面滑移特性

Tab. 3 Wall slip behavior of coal water slurries/coal water paste

浆体参数		$t/^\circ\text{C}$			
$d_p/\mu\text{m}$	$\phi/\%$	20	32	43	52
36.9	51.7	$u_s = 0.0021(\tau_w - 294.5)^{1.13}$	—	—	—
134.5	41.7	无滑移	—	—	—
134.5	47.2	$u_s = 0.00219\tau_w$	—	—	—
134.5	49.5	$u_s = 0.0063(\tau_w - 13.4)$	$u_s = 0.00845(\tau_w - 6.7)$	$u_s = 0.0106(\tau_w - 17.4)$	$u_s = 0.0126(\tau_w - 15.7)$
134.5	51.7	$u_s = 0.00115(\tau_w - 175)^{1.297}$	$u_s = 0.0009(\tau_w - 137)^{1.371}$	$u_s = 0.00062(\tau_w - 114)^{1.481}$	$u_s = 0.0005(\tau_w - 82)^{1.549}$
134.5	53.8	$u_s = 0.00101(\tau_w - 227.7)^{1.25}$	$u_s = 0.00087(\tau_w - 174)^{1.309}$	$u_s = 0.00082(\tau_w - 123.5)^{1.337}$	$u_s = 0.00061(\tau_w - 96)^{1.429}$
134.5	55.1	$u_s = 0.00107(\tau_w - 341.2)^{1.269}$	—	—	—
536.8	51.7	$u_s = 0.00466(\tau_w - 95)^{1.082}$	—	—	—
1 079	63.8	$u_s = 0.00804(\tau_w - 60.4)$	—	—	—

表 4 水煤浆/水煤膏的真实流变特性

Tab. 4 True rheological characteristics of coal water slurries/coal water paste

浆体参数		$t/^\circ\text{C}$			
$d_p/\mu\text{m}$	$\phi/\%$	20	32	43	52
36.9	51.7	$\tau = 138 + 0.287\dot{\gamma}^{1.133}$	—	—	—
134.5	41.7	$\tau = 0.0897\dot{\gamma}$	—	—	—
134.5	47.2	$\tau = 2.50 + 0.122\dot{\gamma}$	—	—	—
134.5	49.5	$\tau = 24.0 + 0.306\dot{\gamma}^{0.973}$	$\tau = 26.5 + 0.290\dot{\gamma}^{0.966}$	$\tau = 25.0 + 0.228\dot{\gamma}^{0.975}$	$\tau = 26.0 + 0.174\dot{\gamma}^{0.988}$
134.5	51.7	$\tau = 93.5 + 0.907\dot{\gamma}^{0.886}$	$\tau = 79.5 + 0.982\dot{\gamma}^{0.876}$	$\tau = 82.0 + 0.929\dot{\gamma}^{0.874}$	$\tau = 80.0 + 0.867\dot{\gamma}^{0.868}$
134.5	53.8	$\tau = 156 + 1.298\dot{\gamma}^{0.944}$	$\tau = 123 + 1.091\dot{\gamma}^{0.965}$	$\tau = 109 + 0.931\dot{\gamma}^{0.976}$	$\tau = 90.0 + 0.833\dot{\gamma}^{0.998}$
134.5	55.1	$\tau = 296 + 0.0424\dot{\gamma}^{1.634}$	—	—	—
536.8	51.7	$\tau = 123 + 0.193\dot{\gamma}^{1.071}$	—	—	—
1079	63.8	$\tau = 78.0 + 2.072\dot{\gamma}$	—	—	—

体呈现剪切稀化特性,但其非牛顿流体特性不显著,只具有较小的屈服应力。如 $d_p=134.5\ \mu\text{m}$ 、 $\varphi=47.2\%$ 、 $t=20\ ^\circ\text{C}$ 时,浆体呈现为宾汉流体,又如 $d_p=134.5\ \mu\text{m}$ 、 $\varphi=49.5\%$ 时,各温度下的浆体虽为屈服-幂率流体,但屈服应力较小,流变特性指数非常接近1;②滑移层的形成动力主要来自于壁面静态损耗效应, u_s 随 τ_w 线性增加, τ_{wc} 值很小并小于对应的 τ_y 值,对水煤膏和 $d_p=536.8\ \mu\text{m}$ 的水煤浆,虽然屈服应力较大,但浆体属于宾汉流体, u_s 随 τ_w 呈线性规律变化,并且 τ_{wc} 小于对应的 τ_y 值,这类浆体的流动同样属于不显著的非牛顿流体的壁面滑移流动。

3) 高度拟塑性非牛顿流体的壁面滑移流动。基本特征:① φ/φ_m 接近1($\varphi/\varphi_m>0.9$),浆体为高度拟塑性的屈服-幂率流体, τ_y 值很高,流变特性指数偏离1,如工况 $d_p=134.5\ \mu\text{m}$ 、 $\varphi=51.7\%\sim 55.1\%$ 。②滑移层的形成动力主要来自于壁面剪切导致的颗粒迁移效应, u_s 随 τ_w 加速增加, τ_{wc} 值很大并大于对应的 τ_y 值。

2.2 流动阻力特性和减阻特性分析

2.2.1 浓度的影响

图3给出了不同浓度下的摩擦阻力系数 f 随流速的变化规律, f 按式(3)计算:

$$f = 2\tau_w / \rho_{\text{mix}} v^2 \quad (3)$$

式中: ρ_{mix} 为水煤浆密度;当 φ 为41.7%~47.2%时,尽管浓度增加幅度较大,但 f 增加相对较小,这是因为在该浓度范围内浆体剪切黏度($\tau/\dot{\gamma}$)增加幅度相对不大,同时壁面上开始产生显著的滑移流动从而部分抵消了剪切黏度增加的影响。当 $\varphi \geq 49.5\%$ 时,屈服应力和剪切黏度迅速增加,同时壁面滑移在远高于屈服应力下才出现,导致 f 随浓度迅速增加。当 $\varphi=55.1\%$ 时, f 值达到 $\varphi=41.7\%$ 时的10倍左右,

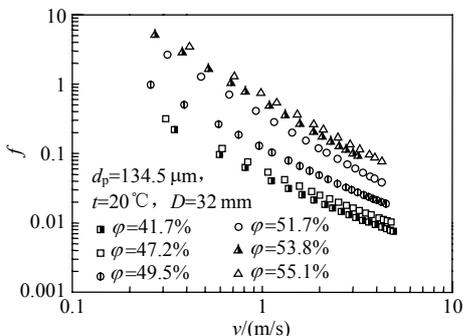


图3 不同浓度下 f 随平均流速的变化规律
Fig. 3 Trend of change in friction factor with mean velocity at various concentrations

此时已不易实现稳定的管道输送。

图4给出了浓度对流动阻力的影响。不同流速下的 f 值随浓度的增加具有相似的变化趋势,这一变化趋势清楚地反映了管内流动形态的变化过程。随浓度的增加, f 增加最剧烈的过程对应着第2种流动形态向第3种流动形态的转变过程,即浓度由49.5%增加到51.7%的过程。第1种流动形态向第2种流动形态转变时,即浓度从41.7%增加到47.2%时, f 增加最为缓慢。

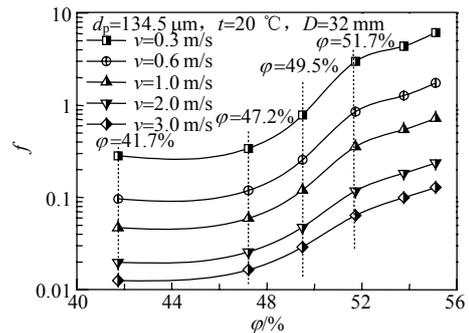


图4 浓度对 f 的影响

Fig. 4 Effect of concentration on friction factor

由于滑移减阻率 D_R 能够反映流变特性和壁面滑移特性的变化对流动阻力的影响,本文采用 D_R 表征壁面滑移的减阻特性,其定义^[23]为

$$D_R = \frac{\Delta p_c - \Delta p_s}{\Delta p_c} = 1 - \frac{f_s}{f_c} \quad (4)$$

式中: Δp_c 和 f_c 分别为壁面无滑移时的压降和摩擦阻力系数,由浆体的真实流变特性并按照无滑移边界条件计算给出; Δp_s 和 f_s 分别为壁面滑移条件下的压降和摩擦阻力系数,前者由压降试验数据给出,后者由压降试验数据并按(3)式计算得到。

图5给出了不同浓度下的 D_R 随流速的变化规律。可以看出, D_R 变化规律与所处的流动形态有关。第2种流动形态下,即 $\varphi=47.2\%$ 和49.5%时, D_R 不随平均流速变化;第3种流动形态下,即 $\varphi \geq 51.7\%$

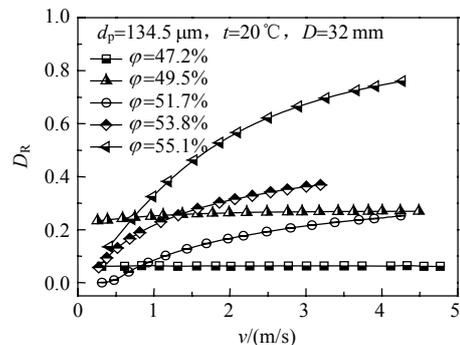


图5 浓度对 D_R 的影响

Fig. 5 Effect of concentration on D_R

时, D_R 都随流速的增加而增加, 并在较高流速下逐步趋于恒定。在 2 种流动形态各自对应的浓度范围内, D_R 都随浓度的增加而增加。第 2 种流动形态下, D_R 随浓度的快速增加是通过壁面滑移速度和浆体剪切黏度的同时增加实现的。第 3 种流动形态下, 当浓度增加时, 壁面滑移速度减小而浆体的剪切黏度增加, 因而 D_R 随浓度的快速增加完全是由于浆体剪切黏度的急剧增加所致。

2.2.2 管径的影响

图 6(a)~(c) 给出了 3 种浆体(3 种流动形态)的摩擦阻力系数随流速和管径的变化规律。第 1 种流动形态下, 管径对 f 的影响最显著。随浓度的增加, 流动形态转变为非牛顿流体的壁面滑移流动时, 管径对 f 的影响显著减小, 这主要基于以下 2 个因素:

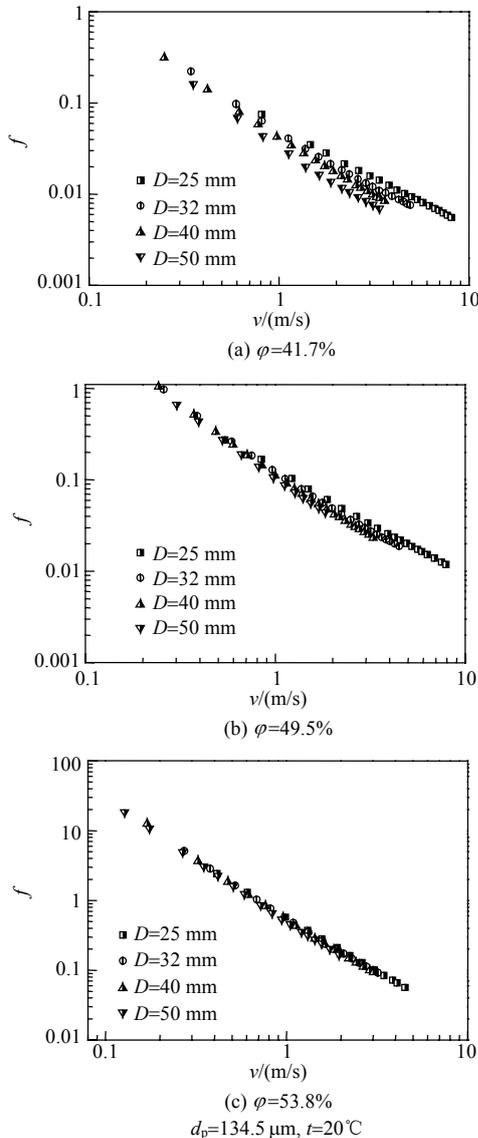


图 6 管径对 f 的影响

Fig. 6 Effect of pipe diameter on friction factor

①浆体的剪切稀化特性。49.5%和 53.8%的浆体即使在壁面无滑移条件下, 其剪切稀化特性仍会导致流动阻力对管径变化的敏感性远不如牛顿流体时显著^[24]。②壁面滑移因素。壁面滑移效应随管径增大而降低^[25], 当保持相同流速时, 管径的增大相当于附加了流动阻力, 导致 f 随管径的变化很不敏感。 $\phi=55.1\%$ 时, 浆体在高剪切速率下呈现显著的剪切增稠特性($n=1.634$), f 对管径的变化最不敏感, 这完全是由显著增加的壁面滑移效应所致。当流动属于第 3 种形态时($\phi=53.8\%$ 和 55.1%), 管径变化对 f 的影响已非常小。因此, 对这类高浓度浆体, 若同时具有高度拟塑性的非牛顿流体特性和显著的壁面滑移效应, 采用增大管径来降低流动阻力的措施不是很适用。

图 7(a)~(b) 给出了第 2 种流动形态和第 3 种流动形态下管径变化对 D_R 的影响。2 种流动形态下, D_R 都随管径的增大而降低。 $\phi=49.5\%$ 时, 不同管径下的 D_R 都与流速无关; 当管径增大 1 倍时, D_R 减小为原来的 1/2 左右。 $\phi=53.8\%$ 时, 不同管径下的 D_R 值都随流速的增大而增大。可见, 对以上 2 种浆体, 随流速的增加, 不同管径下的 D_R 都保持了各自相似的变化规律。由此断定, 管径变化不会引起

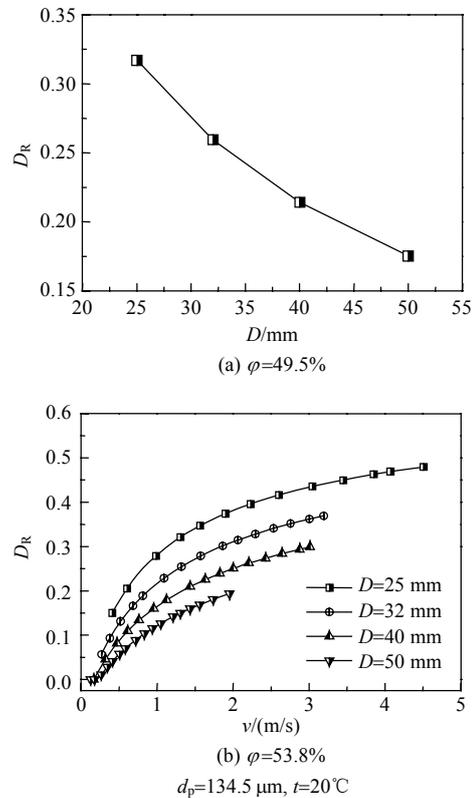


图 7 管径对 D_R 的影响

Fig. 7 Effect of pipe diameter on D_R

流动形态的改变。

2.2.3 温度的影响

图 8(a)~(b)给出了 f 随温度的变化规律。2 种浓度下, 由于温度升高同时实现了浆体剪切黏度的降低和壁面滑移速度的增大, f 都随温度的升高而显著降低。尽管 2 种浆体同属于屈服-幂率流体, 但由于流动形态不同, 2 者的流动阻力随温度的变化规律又有所不同。 $\varphi=49.5\%$ 时, 温度升高对 τ_y 和 τ_{wc} 影响很小(见表 4 和表 3), 这导致在低流速范围内, 不同温度下的 f 差别不大, 但随流速的增加, 温度升高对 f 的降低越显著。 $\varphi=53.8\%$ 时, τ_y 和 τ_{wc} 都随温度的升高而显著减小, 导致 f 在低流速下就显著降低。

图 9(a)~(b)给出了温度变化对 D_R 的影响。 $\varphi=49.5\%$ 时, 各个温度下的 D_R 都不随流速变化; 在 32 °C 时, D_R 达到最高值, 温度继续升高时, D_R 略有下降。 $\varphi=53.8\%$ 时, D_R 随温度升高而升高, 而且不同温度下 D_R 都随流速的增加而增加。可见, 对以上 2 种浆体, 随流速的增加, 不同温度下的 D_R 都保持了各自相似的变化规律。由此断定, 温度的变化同样不会引起流动形态的改变。

对低浓度浆体(如 $\varphi=41.7\%$), 其流动属于第 1 种形态, 升高温度只能降低浆体的黏度, 不会改变

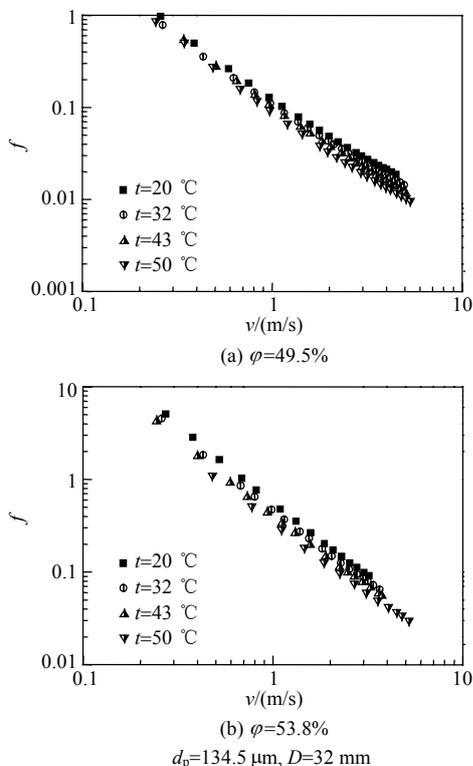


图 8 温度对 f 的影响

Fig. 8 Effect of temperature on friction factor

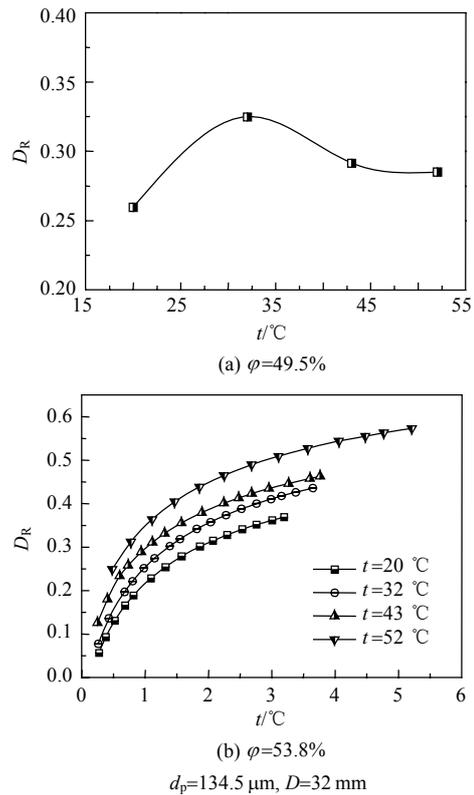


图 9 温度对 D_R 的影响

Fig. 9 Effect of temperature on D_R

壁面流动条件, 而且煤粉颗粒间的作用距离较大, 温度升高对黏度的降低远不如高浓度时显著。对这类浆体, 升高温度对流动阻力的降低远不如高浓度时显著。

2.2.4 煤粉平均粒径的影响

图 10 显示了煤粉平均粒径对摩擦阻力系数的影响。对所试验的 3 种水煤浆, 随煤粉粒径的增大, 浆体的剪切黏度降低而壁面滑移速度增大, 导致 f 显著降低。水煤膏具有较高的壁面滑移速度, 但其剪切黏度远大于其他 3 种浆体, 其 f 值相对于 $d_p=538.6 \mu\text{m}$ 时略有降低。表 3、表 4 的结果表明, 随煤粉粒径的增大, 流动由第 3 种形态($d_p=36.9$ 和 $134.5 \mu\text{m}$)向第 2 种形态($d_p=538.6$ 和 $1079 \mu\text{m}$)转变。由图 10 看出, 在第 3 种流动形态下, 增大煤粉粒径对摩擦阻力的降低更显著。燃烧和气化用水煤浆的煤粉粒径分别与 36.9 和 $134.5 \mu\text{m}$ 接近, 因此在满足其他要求的情况下, 采用较大的煤粉粒径可以有效地降低输送阻力。

图 11 显示了煤粉平均粒径对滑移减阻率的影响。 $d_p=36.9$ 和 $134.5 \mu\text{m}$ 时, D_R 均随流速的增加而增加, 并在高流速下趋向稳定。当 $d_p=538.6$ 和 $1079 \mu\text{m}$ 时, 流动虽然属于第 2 种形态, 但浆体具有较大的

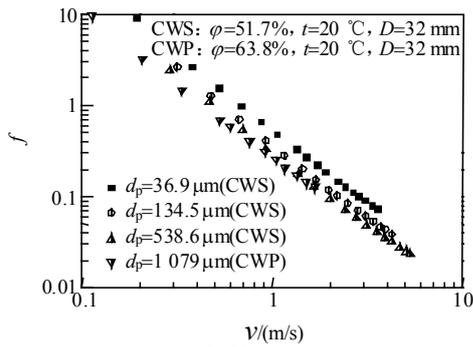


图 10 煤粉粒径对 f 的影响

Fig. 10 Effect of particle size on friction factor

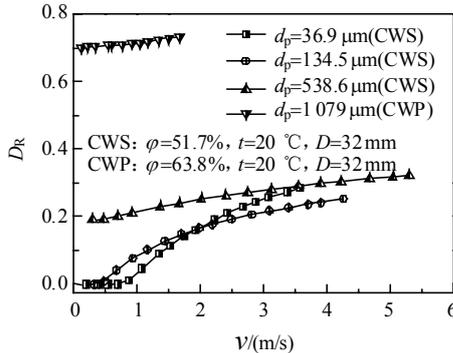


图 11 煤粉粒径对 D_R 的影响

Fig. 11 Effect of particle size on friction factor

屈服应力，导致 D_R 与流速间产生弱相关性，即随流速的增加， D_R 呈线性规律缓慢增加。可见，流动形态相同时，随流速增大，不同粒径下 D_R 的变化趋势保持相似性。

3 结论

1) 水煤浆的管内流动兼具单相流体和液固两相流体的特征，当浓度、温度、煤粉粒径和管径变化时，都是通过改变浆体的流变特性和壁面流动条件进而改变管内流动阻力的。

2) 浓度、温度、煤粉粒径和管径对流动阻力的影响特性与所处的流动形态密切相关。反之，浓度和煤粉粒径的变化可以引起流动形态的改变；而对给定的液-固两相系统，浓度是流动形态的决定因素，温度和管径的变化仅在原有的流动形态下改变壁面滑移流动和主流区流动的对比关系。

3) 滑移减阻率的计算结果显示，壁面滑移对流动阻力的大小和变化趋势具有十分重要的影响。在同一流动形态范围内，不同的浓度、温度、煤粉粒径或管径下，滑移减阻率随流速的变化规律具有相似性。

参考文献

[1] 周俊虎, 匡建平, 周志军, 等. 黑液水煤浆焦与普通水煤浆焦 CO_2

催化气反应特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(12): 149-155.

Zhou Junhu, Kuang Jianping, Zhou Zhijun, et al. Research on alkali-catalysed CO_2 -gasification of coal black liquor slurry char and coal water slurry char[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(12): 149-155(in Chinese).

[2] 丁宁, 张传名, 曹欣玉, 等. 410 t/h 六角切圆锅炉水煤浆燃烧试验与数值模拟[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(11): 41-46.

Ding Ning, Zhang Chuanming, Cao Xinyu, et al. Experimental research and numerical simulation on combusting CWS in 410 t/m six-corner tangentially firing boiler[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(11): 41-46(in Chinese).

[3] 岑可法, 姚强, 曹欣玉, 等. 煤浆燃烧、流动、传热和气化的理论与应用技术[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1997: 26-35.

Cen Kefa, Yao Qiang, Cao Xinyu, et al. Theory and application of combustion, flow, heat transfer and gasification of coal slurry [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 1997: 26-35(in Chinese).

[4] Turian R M, Ma T W, Hsu F L G, et al. Characterization, settling, and rheology of concentrated fine particulate mineral slurries [J]. Powder Technology, 1997, 93(3): 219-233.

[5] Turian R M, Attal J F, Sung D J, et al. Properties and rheology of coal-water mixtures using different coals[J]. Fuel, 2002, 81(16): 2019-2033.

[6] 孟令杰, 孔珑, 章名耀. 水煤浆管内流动的相似准数及其阻力特性[J]. 化工学报, 1995, 46(3): 298-303.

Meng Lingjie, Kong Long, Zhang Mingyao. Similitude criterion and resistance characteristics of coal-water slurry flowing in pipe [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 1995, 46(3): 298-303(in Chinese).

[7] 肖锡发, 王世均. 高浓度水煤浆管道输送滑移减阻试验研究[J]. 钢铁, 1994, 29(4): 68-71.

Xiao Xifa, Wang Shijun. Experimental study of drag reduction by slippage on pipe line transportation of highly loaded coal-water slurry[J]. Iron and Steel, 1994, 29(4): 68-71(in Chinese).

[8] Antonini G, Francois O, Gislais P, et al. Direct rheological characterization of highly loaded coal-water slurries flowing through pipes[C]. Proceedings of Sixth International Symposium on Coal Slurry Combustion And Technology, Hyatt Orlando, Florida, UAS, 1984: 266-281.

[9] 陈良勇, 段钰锋, 赵国华, 等. 浓度对水煤浆滑移特性和真实流变特性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(20): 48-54.

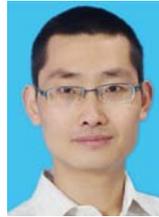
Chen Liangyong, Duan Yufeng, Zhao Guohua, et al. Effects of concentration on wall slip behavior and rheological characteristics of coal water slurry[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(20): 48-54(in Chinese).

[10] Barnes H A. A review of the slip (wall depletion) of polymer suspensions, emulsions and particle suspensions in viscometers: its cause, character and cure[J]. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 1995, 56(3): 221-251.

[11] Allende M, Kalyon D M. Assessment of particle -migration effects in pressure-driven viscometric flows[J]. Journal of Rheology, 2000, 44(1): 79-90.

[12] Ruiz-Viera M J, Delgado M A, Franco J M, et al. On the drag reduction for the two-phase horizontal pipe flow of highly viscous non-Newtonian liquid/air mixtures: case of lubricating grease [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2006, 32(2): 232-247.

- [13] Delgado M A, Franco J M, Partal P, et al. Experimental study of grease flow in pipelines: wall slip and air entrainment effects [J]. *Chemical Engineering and Processing*, 2005, 44(7): 805-817.
- [14] 夏德宏, 周军, 郭婕. 宾汉流体管流减阻机制及措施[J]. *冶金能源*, 2002, 21(1): 31-34.
Xia Dehong, Zhou Jun, Wu Jie. The drag reduction mechanism and measures for pipe flow of Bingham fluids[J]. *Energy for Metallurgical Industry*, 2002, 21(1): 31-34(in Chinese).
- [15] 夏德宏, 周军. 幂律流体管流的减阻机制[J]. *冶金能源*, 2000, 19(3): 19-22.
Xia Dehong, Zhou Jun. The drag reduction mechanism in pipe flow of power-law fluids[J]. *Energy for Metallurgical Industry*, 2000, 19(3): 19-22(in Chinese).
- [16] 徐桂云, 李浴, 张永忠. 润滑脂在钢管中含壁滑移流动的阻力特性[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2004, 36(11): 1581-1584.
Xu Guiyun, Li Yu, Zhang Yongzhong. Resistance property of the lubricating grease flowing in pipes with wall-slip[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2004, 36(11): 1581-1584(in Chinese).
- [17] 卢平. 水煤膏输送特性和喷雾特性及其直接数值模拟的研究[D]. 南京: 东南大学, 2002.
Lu Ping. An investigation on transportation properties and atomization properties of coal water paste and its direct number simulation[D]. Nanjing: South East University, 2002(in Chinese).
- [18] 孟令杰. 增压流化床煤水混合物输送特性研究[D]. 南京: 东南大学, 1996.
Meng Lingjie. An investigation on transportation properties of coal water paste for the pressurized fluidized bed combustion [D]. Nanjing: South East University, 1996(in Chinese).
- [19] Soltani F, Yilmazer U. Slip velocity and slip layer thickness in flow of concentrated suspensions[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 1998, 70(3): 515-522.
- [20] Acikalin S, Yilmazer U. Effect of volume fraction and particle size on wall slip in flow of polymeric suspensions[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2005, 98(1): 439-448.
- [21] Soltani F, Yilmazer U. Effects of slip at the wall on the viscosity of suspensions with a polymeric matrix[J]. *Advances in Polymer Technology*, 1999, 18(4): 336-342.
- [22] Lu P, Zhang M Y. Resistance properties of coal-water paste flowing in pipes[J]. *Fuel*, 2002, 81(7): 877-881.
- [23] Fernandes R L J, Jutte B M, Rodriguez M G. Drag reduction in horizontal annular two-phase flow[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2004, 30(9): 1051-1069.
- [24] 江体乾. 化工流变学[M]. 上海: 华东理工大学出版社, 2004: 277-278.
Jiang Tiqian. *Chemical engineering rheology*[M]. Shanghai: East China University of Science and Technology Press, 2004: 277-278(in Chinese).
- [25] Kalyon D M. Apparent slip and viscoplasticity of concentrated suspensions[J]. *Journal of Rheology*, 2005, 49(3): 621-640.



陈良勇

收稿日期: 2009-05-20.

作者简介:

陈良勇(1977—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为洁净煤发电和两相流, lych059032@163.com;

段钰锋(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事煤洁净利用、燃煤污染物控制及两相流方面的研究。

(责任编辑 车德竞)