DOI：10.16198/j.cnki.1009-640X.2018.06.009
吴优，曹斌，夏建新. 基于滑移效应的水煤浆膏体管道输送阻力计算[J]. 水利水运工程学报，2018(6)：70-76.（WU You，CAO Bin，XIA Jianxin. Transport resistance characteristics of coal-water slurry considering effects of wall slip[J]. Hydro-Science and Engineering，2018(6)：70-76.（in Chinese））

基于滑移效应的水煤浆膏体管道输送阻力计算

吴　优，曹　斌，夏建新
（中央民族大学 生命与环境科学学院，北京　100081）

摘要：随着煤化工产业的发展，煤炭如何高效清洁输送成为研究的热点。利用管道水力输送高浓度水煤浆具有投资少、节能环保等明显优势。由于小管径试验操作更加方便，更加节省物料，试验室中常用小管径进行工艺参数试验。试验研究了质量浓度为 53%和 58%的高浓度水煤浆在管径为 50，47，32 和 29 mm 管道中的流动特性。推导了滑移条件下不同流型流体的流变参数计算式，并基于滑移效应分析，得到了水煤浆的阻力系数。通过均质流阻力计算式得到高浓度水煤浆的阻力，计算结果表明，水煤浆的流变模型符合 Herschel-Bulkey 模型，考虑滑移效应条件下，高浓度水煤浆阻力系数与广义雷诺数存在一定关系，阻力可用均质流公式进行计算。

关　键　词：阻力系数；雷诺数；水煤浆；阻力特性；管流
中图分类号：O 373；TV134　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1009-640X(2018)06-0070-07

随着我国煤化工产业的快速发展，煤炭如何高效清洁运输已成为一项重要研究任务[1-3]。为加快陕北煤炭资源的利用，我国于 2017 年建成了长达 700 km 的神木—南输煤管线。管内水煤浆流动阻力对管道泵送动力选择和管道的安全高效运行具有十分重要的意义。Durand[4]、瓦斯普[5]等对管道水力输送阻力损失进行了大量试验研究和系统分析。杜兰德公式适用于非均质流体阻力计算[6]，对于水煤浆并不适用，瓦斯普的均质浆体阻力计算公式使用效果不理想。赵国华等[7-12]都从级配、浓度、管径等角度对水煤浆流动的影响进行了研究，但都没有考虑高浓度水煤浆的滑移效应对阻力损失的影响。当水煤浆浓度较高时，非牛顿体特性显著，流动过程中产生滑移现象，使得水煤浆流变试验结果发生变化。测量存在壁面滑移效应的流变特性，必须考虑壁面滑移的影响。试验中常用小管径模拟，而管径大小会影响流变测量结果，只有消除壁面滑移的影响才能得到真实的流变特性。任远[13]在得到水煤浆真实流变特性后计算出阻力系数与雷诺数的关系，但是由于试验条件限制，广义雷诺数范围较小。

本文分析滑移条件下水煤浆真实流变特性变化，推导并验证管道阻力损失系数与广义雷诺数的关系，提出滑移条件下水煤浆阻力计算式，为煤浆水力输送管道工程设计提供依据。

1　广义雷诺数和管道沿程阻力系数的确定方法

1.1　广义雷诺数

在无滑移条件下，假定浆体流速梯度是切应力的函数，即：

$$\mathrm{d}u/\mathrm{d}r = f(\tau) \tag{1}$$

将上式改写为：

收稿日期：2017-12-21
基金项目：国家自然科学基金资助项目(51339008，51209238，51434002)
作者简介：吴　优(1993—)，女，湖北黄冈人，硕士研究生，主要从事水沙环境工程研究。E-mail：501941479@qq.com
通信作者：夏建新(E-mail：jxxia@vip.sina.com)

$$u = \int_r^R f(\tau)\,\mathrm{d}r \tag{2}$$

式中：R 为管道半径；r 为任意一点到该点所在断面中心点的距离；u 为浆体流速。

切应力可由下式计算：

$$\tau = \Delta P r/(2L) \tag{3}$$

式中：ΔP 为浆体流经长度为 L 的管道的压降。

$$Q = 2\pi\int_0^R ru\mathrm{d}r = 2\pi\int_0^R r\left[\int_r^R f(\tau)\,\mathrm{d}r\right]\mathrm{d}r = \pi\int_0^R r^2 f(\tau)\,\mathrm{d}r \tag{4}$$

$$\mathrm{d}r = (R/\tau_\omega)\,\mathrm{d}\tau \tag{5}$$

由 $Q = \dfrac{\pi R^3}{\tau_\omega^3}\displaystyle\int_0^{\tau_\omega}\tau^2 f(\tau)\,\mathrm{d}\tau$ 变形得：

$$\frac{Q\tau_\omega^3}{\pi R^3} = \int_0^{\tau_\omega}\tau^2 f(\tau)\,\mathrm{d}\tau \tag{6}$$

对 τ_ω 微分，

$$\frac{3Q\tau_\omega^2}{\pi R^3} + \tau_\omega^3\mathrm{d}\left(\frac{Q}{\pi R^3}\right)/\mathrm{d}\tau_\omega = \tau_\omega^2 f(\tau_\omega) \tag{7}$$

$$f(\tau_\omega) = \left(\frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}r}\right)_\omega = \frac{3}{4}\frac{4Q}{\pi R^3} + \frac{\tau_\omega}{4}\frac{\mathrm{d}\left(\frac{4Q}{\pi R^3}\right)}{\mathrm{d}\tau_\omega} = \frac{8u}{D}\left[\frac{3}{4} + \frac{1}{4}\frac{\mathrm{d}\ln\left(\frac{8u}{D}\right)}{\mathrm{d}\ln\tau_\omega}\right] \tag{8}$$

$$n = \mathrm{d}\ln\left(\frac{8u}{D}\right)/\mathrm{d}\ln\tau_\omega \tag{9}$$

$$\gamma_\omega = \frac{8u}{D}\left(\frac{1+3n}{4n}\right) \tag{10}$$

式(8)~(10)对于牛顿体、宾汉体、伪塑性体、膨胀体都适用。从式(9)可得到 Metzner-Reed 通用模型

$$\tau_\omega = \frac{\Delta P r}{2L} = k'\left(\frac{8u}{D}\right)n' \tag{11}$$

式中：k' 为流变系数；n' 为流变指数。对于与时间无关的非牛顿体，$8u/D$ 是剪切力的函数，通过试验可以得到剪切力与 $8u/D$ 的关系，每一个切应力可以得到一个对应的 $8u/D$ 与 n'，因此，每一个切应力可以找到与之对应的切变速率。牛顿体在圆管中的雷诺数定义为：

$$Re = D\rho_\mathrm{m}u/\mu \tag{12}$$

广义雷诺数定义为

$$Re_\mathrm{g} = \rho_\mathrm{m}uD/\mu_\mathrm{e} \tag{13}$$

式中：μ_e 为非牛顿体有效黏度。广义雷诺数将原式中的牛顿体黏度用有效黏度代替。

$$\mu_\mathrm{e} = \tau_\omega/(8u/D) \tag{14}$$

进一步推导式(13)，

$$Re_\mathrm{g} = \frac{\rho_\mathrm{m}uD}{\mu_\mathrm{e}} = \frac{\rho_\mathrm{m}uD}{\tau_\omega/\left(\frac{8u}{D}\right)} = \frac{\rho_\mathrm{m}uD}{k'\left(\frac{8u}{D}\right)^{n'-1}} = \frac{Dn'\rho_\mathrm{m}u^{2-n'}}{k'8^{n'-1}} \tag{15}$$

对于滑移存在的条件下，

$$Q = Q_\mathrm{s} + Q_\mathrm{c} \tag{16}$$

$$u = u_\mathrm{s} + u_\mathrm{c} \tag{17}$$

式中：Q_c 为无滑移的流量；Q_s 为滑移引起的附加流动的流量；u_c 为无滑移速度，u_s 为滑移引起的附加流动的速度 。由式(7)可得：

$$\frac{8u}{D}=\frac{8\,u_s\tau_\omega}{D}+\frac{4}{\tau_\omega^3}\int_0^{\tau_\omega}\tau^2 f(\tau)\,\mathrm{d}\tau \tag{18}$$

滑移条件下有效黏度：

$$\mu_e=\frac{\tau_\omega}{\frac{8\,u_c}{D}}=\frac{\tau_\omega}{\frac{8(u-u_s)}{D}}=\frac{D\tau_\omega}{8(u-u_s)}\frac{u-u_s}{u}=\mu_e\left(1-\frac{u_s}{u}\right)=\frac{\tau_\omega^4}{4\int_0^{\tau_\omega}\tau^2 f(\tau)\,\mathrm{d}\tau} \tag{19}$$

通过式(18)可以得到真实的流变曲线。Crawford[14]认为 $u_s=\beta\tau_\omega/R^d$ ，d 取值为 0 时可以得到 Mooney 公式；d 取值为 1 时可得到 Jastrzebski 公式，选取 Crawford 的方法进行计算。横坐标为 $4/R^{1+d}$ ，纵坐标为 $8u/(D\tau_\omega)$ ，斜率为滑移系数，可以通过滑移系数得到滑移速度。每一个 τ_ω 对应一个 u_s ，通过 $Q_s=\pi R^2u_s^2$ ，可以求得 Q_s ，通过 $Q=Q_s+Q_c$ 可以求得 Q_c 。通过 Q_c 可以求得 n 和 γ，得到真实的流变曲线图。对 n 值的计算，在偏离线性不大的情况下，从对数据的线性回归得到平均值；如偏离线性很明显，则采用分段直线拟合的方法[15]，也可使用非线性拟合的方法拟合。

将各流体模型代入式(19)积分后可得不同流变模型下的有效黏度，见表 1。

表 1 不同流变模型有效黏度

Tab. 1 Effective viscosity of different rheological models

流体类型	流体模型	有效黏度
牛顿体	$\tau=\mu\gamma^n$	μ
宾汉体	$\tau=\tau_y+\eta\gamma$	$\eta/(1-\frac{4a}{3}+a^4/3)$
幂律体	$\tau=k\gamma^n$	$k(\frac{1+3n}{4n})n\left(\frac{8\,u_c}{D}\right)^{n-1}$
屈服幂律体	$\tau=\tau_y+k\gamma^n$	$\frac{k^{\frac{1}{n}}\tau_\omega^4}{f(\tau_\omega)}$， $f(\tau_\omega)=\frac{4n(\tau_\omega-\tau_y)^{\frac{3n+1}{n}}}{3n+1}+\frac{8n\,\tau_y(\tau_\omega-\tau_y)^{\frac{2n+1}{n}}}{2n+1}+\frac{4n\tau_y^2(\tau_\omega-\tau_y)^{\frac{n+1}{n}}}{n+1}$

1.2 管道沿程阻力系数

由于流体中颗粒较细，因此采用均质流阻力公式进行计算，阻力计算式为

$$i=\lambda\frac{u^2}{2gD}\frac{\rho_m}{\rho_l} \tag{20}$$

式中：ρ_m 为流体密度(kg/m^3)；ρ_l 为水密度(kg/m^3)。

阻力系数定义为：

$$\lambda=8\,\tau_\omega/(\rho_m\,u^2) \tag{21}$$

由式(13)，(14)与(21)可得滑移存在条件下的沿程阻力系数：

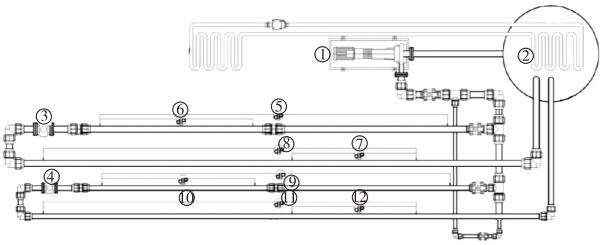
$$\lambda=64/Re_g \tag{22}$$

2 试验装置及方法

该试验系统由管道输送子系统、测量子系统及控制子系统构成，如图 1 所示。管道输送子系统包括动力泵、冷却装置及长度为 4.5 m，管径分别为 50，47，32 和 29 mm 的 4 条不锈钢输送管道。控制子系统主要是流量调节器以及控制开关。测量子系统由流量计、压差计、温度计以及数据采集系统(每 3 s 测量 1 次数据)

构成。每个试验工况重复 2~3 次。

试验中选取 d_{50} = 103.2 μm 的煤粉，粒径分布如图 2 所示。试验过程中，由泵将水煤浆打入管道循环回路，通过管道重新流回至料仓，从而进行循环使用。首先进行清水试验用于仪器校准，然后使用水煤浆进行管道试验。对于不同浓度的膏体试验，通过加水使膏体浓度由高到低。在每次试验中，选择 1 个回路，即 2 个不同管径的管道进行试验。试验过程中通过调节泵的转速来改变管道流量，试验过程中速度由低到高然后逐渐减小至 0。调节速度后，待系统稳定后记录此时压差计与流量计数据、时间与温度。每个回路试验过程中取 2 个水煤浆样品用于测量密度与质量浓度。



1–泵; 2–冷凝管; 3,4–流量计; 5,8,9,11–测量段降; 6,7,10,12–对照测量段

图 1　试验系统

Fig. 1　Schematic diagram of experimental system

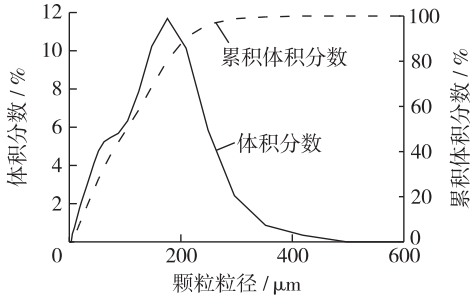


图 2　颗粒粒径分布曲线

Fig. 2　Particle size distribution of coal particles

3　结果与分析

3.1　流变特性

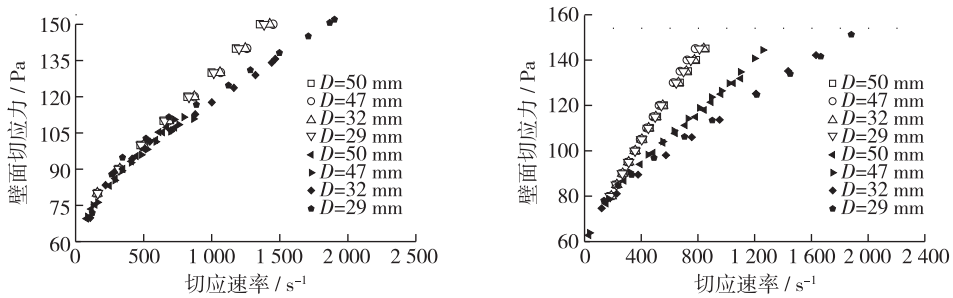
根据管流法原理可以得到 2 种不同浓度膏体的流变方程，参数如表 2 所示。水煤浆流变曲线如图 3 所示。从图 3 可以看出水煤浆流变模型与 Hersher-Buckley 流体方程中的宾汉塑性模型非常相似。Hersher-Buckley 模型通用方程为 $\tau = \tau_0 + K\gamma^n$，其中 τ 为剪切应力(Pa)；τ_0 为屈服剪切应力(Pa)；K 为稠度系数(Pa/s)；γ 为剪切速率(s^{-1})；n 为流动指数。

水煤浆流变曲线为本身的特性，与输送的管径无关，而从图 3 可以看出，浓度为 53% 和 58% 的膏体流变试验点(实心点)在不同管径条件下不能重合，说明在此浓度条件下存在滑移。对于存在滑移的水煤浆，得到的流变特性不是水煤浆的真实流变特性，因此需要对数据进行修正(图 3 中空心点为修正后的数据)。通过图 3 可以看出，同一浓度条件下，管径越小滑移越明显，偏离真实的流变曲线越远。随着切应力增大，滑移效应也越来越明显。

表 2　流变特性参数

Tab. 2　Rheological parameters of coal-water slurry with different concentrations

体积浓度 C_v/%	屈服剪切应力 τ_0 /Pa	稠度系数 K/(Pa·s^{-1})	流动指数 n	滑移参数 d
53	67.76	0.141	0.878	1
58	63.74	0.100	0.995	2



(a) 水煤浆浓度为53%　　(b) 水煤浆浓度为58%

图 3　不同浓度水煤浆滑移修正前后流变特性比较

Fig. 3　Comparison of rheological properties before and after correction

3.2 阻力特性

滑移现象的存在影响了阻力特性的测量。通过试验来验证雷诺数与阻力系数之间的关系。图 4 为水煤浆沿程阻力系数与雷诺数的关系,其中低浓度为卢平的研究成果[17],Re_g在 1~2 100内。其中雷诺数通过式(13)得到,阻力系数通过式(21)得到。由图可知,Re_g 在试验范围内,实测值与计算值之间的相对误差小于10%,说明在此范围内水煤浆在管内流动的阻力系数与牛顿流体和其他无滑移现象的非牛顿流体的阻力系数与雷诺数都是线性关系。高浓度水煤浆在广义雷诺数试验范围内,在管道内是层流流动。水流层流、紊流的雷诺数分界线是2 320,这说明水煤浆紊流的雷诺数大于水流。由此也说明推导出的公式适用于有滑移现象存在的水煤浆,可以用来预测在该范围内的阻力系数。图 5 为同一浓度条件下不同计算式得到的阻力损失的比较。在同一浓度下,速度一定时,管径越小,阻力损失越大。从图 5 还可发现,本文计算式得到的结果与实测值最吻合。

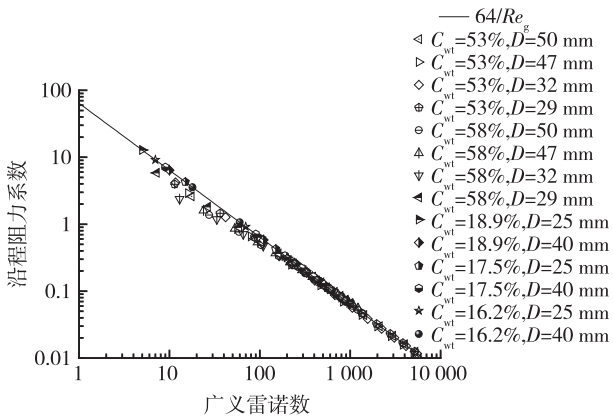


图 4 水煤浆沿程阻力系数与雷诺数的关系

Fig. 4 Relationships between λ and Re_g

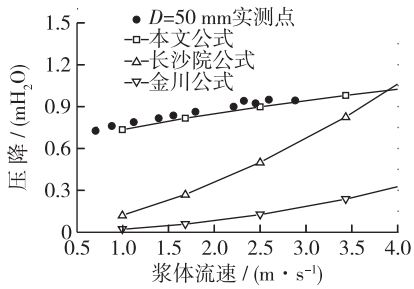


图 5 浓度为 53%时不同阻力计算公式结果比较

Fig. 5 Comparison between different formulas at 53% solid content

4 阻力计算结果比较

表 3 为浆体输送常用的一些阻力计算式,选取条件较为相似的计算式进行计算并与本文结果比较。

表 3 摩阻损失经验式[18-19]

Tab. 1 Empirical formula for frictional loss

序号	出处	公式	适用条件
1	本文公式	$\frac{\Delta P}{L}=\lambda\cdot\frac{\rho_m v^2}{2}$	
2	金川公式[18]	$i_m=i_0(1+108)c_v^{3.96}\left(\frac{gD(\rho_s-1)}{v^2\sqrt{c_D}}\right)1.12$	$D=100$ mm $C_w=37\%\sim54\%$ 使用条件为金川-3 mm 棒磨砂高浓度料浆
3	长沙矿冶研究院公式[19]	$i_m=(1+3.68\sqrt{gD}/v\left(\frac{\rho_m-\rho_0}{\rho_0}\right)^{3.3})\frac{\rho_m}{\rho_0}i_0$	$D=54,68,81$ mm $\rho_m=1.3\sim1.6$ g/ m^3

注:i_m 为浆体摩阻损失;i_0 为水的摩阻损失;v 为流速;c_D 为颗粒拖曳力系数;D 为管径;c_v为浆体体积浓度;f 为范宁摩阻系数;λ 为摩阻系数。ρ_0 为水的密度;ρ_m 为浆体密度;$\lambda=0.11(\frac{\Delta}{D}+\frac{68}{Re})^{0.25}$,$\lambda$ 为阻力系数;Δ 为管道粗糙度;Re 为雷诺数。

由表 3 和图 5 可见,金川公式和长沙院公式与本文拟合结果有一定差别。因为这些常用的计算式没有考虑滑移效应,适用煤粉输送的计算式的试验中采用的管径较大,颗粒粒径较大,其滑移效应不显著。图 5 为同一浓度条件下不同管径时的阻力损失,对比发现本文的计算式的结果更符合试验结果。在速度较小时,

金川公式和长沙院公式结果小于实测值;速度较大时,长沙院公式较实测值偏大。刘晓辉[16]通过试验验证金川公式在颗粒较小时所得结果偏小。从图 5 可以看出随着速度的增加,阻力损失也随之增加,但是实测的阻力损失增加缓慢,而计算值则快速增加。这是由于随着速度的增加,水煤浆的滑移效应增强,水煤浆与壁面的摩擦减小,因此随着速度增加,实测的摩阻损失增幅小于计算值。

5　结　语

分析了不同流型流体的沿程阻力系数与广义雷诺数的关系。对于存在滑移现象的膏体可以采用广义雷诺数进行阻力系数的求解。通过试验得到水煤浆真实流变特性。试验验证了在一定雷诺数范围内,阻力系数的计算式与牛顿流体的计算式具有相同形式。

常用浆体输送阻力计算式对于小管径细颗粒具有滑移特性的膏体不适用,采用去除滑移效应得到的计算式才能更真实反映阻力损失。

参　考　文　献:

[1] 王伟东，李少杰，韩九曦. 世界主要煤炭资源国煤炭供需形势分析及行业发展展望[J]. 中国矿业，2015，24(2)：5-9.（WANG Weidong，LI Shaojie，HAN Jiuxi. Analysis of the main global coal resources countries' supply-demand structural trend and coal industry outlook[J]. Chinese Mining Magazine，2015，24 (2)：5-9.（in Chinese））

[2] 赵光宇，窦文英. 水煤浆的管道输送工程[J]. 中国煤炭，2003，29(8)：12-13.（ZHAO Guangyu，DOU Wenying. Pipeline transportation of coal water slurry[J]. China Coal，2003，29(8)：12-13.（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.（CEN Kefa，YAO Qiang，CAO Xinyu，et al. Coal slurry combustion flow，heat transfer and gasification theory and application technology[M]. Hangzhou：Zhejiang University Press，1997.（in Chinese））

[4] DURAND R. The hydraulic transportation of coal and other materials in pipes [M]. London：College of National Coal Board，1952.

[5] 瓦斯普. 固体物料的浆体管道输送[M]. 黄河水利委员会，译. 北京：水力电力出版社，1980.（WASP E J. Slurry pipeline transportation of solid materials[M]. Translated by The Yellow River Hydraulic Commission. Beijing：Hydraulic Power Press，1980.（in Chinese））

[6] 费祥俊，王可钦，翟大潜，等. 长距离管道输送中浆体物理特性及输送参数的试验研究[J]. 水利学报，1984(11)：15-25.（FEI Xiangjun，WANG Keqin，ZHAI Daqian，et al. Experimental study on physical properties and transport parameters of slurry in long distance pipeline[J]. Journal of Hydraulic Engineering，1984(11)：15-25.（in Chinese））

[7] 赵国华. 水煤浆管内流动阻力特性的数值模拟及实验研究[D]. 南京：东南大学，2007.（ZHAO Guohua. Numerical simulation and experimental study on flow resistance characteristics of coal water slurry[D]. Nanjing：Southeast University，2007.（in Chinese））

[8] 赵利安. 煤浆管道输送颗粒级配降级研究[J]. 水利水运工程学报，2016(6)：109-115.（ZHAO Li'an. Test analysis of particle size distribution degradation for coal slurry conveying by pipelines[J]. Hydro-Science and Engineering，2016(6)：109-115.（in Chinese））

[9] 陈良勇，段钰锋，刘猛，等. 壁面滑移条件下水煤浆的流动阻力和减阻特性[J]. 中国电机工程学报，2010，30(5)：41-48.（CHEN Liangyong，DUAN Yufeng，LIU Meng，et al. Flow resistance and drag-reduction properties of coal water slurries in pipe flow with the presence of wall slip[J]. Proceeding of the CSEE，2010，30(5)：41-48.（in Chinese））

[10] CHEN I，DUAN Y，ZHAO C，et al. Rheological behavior and wall slip of concentrated coal water slurry in pipe flows[J]. Chemical Engineering and Processing Process Intensification，2009，48(7)：1241-1248.

[11] CHEN L，DUAN Y，LIU M，et al. Slip flow of coal water slurries in pipelines[J]. Fuel，2010，89(5)：1119-1126.

[12] 张胜局，段清兵，何国锋，等. 神府煤水煤浆管道输送试验研究[J]. 洁净煤技术，2014，20(5)：36-39.（ZHANG Shengju，DUAN Qingbing，HE Guofeng，et al. Pipeline transportation experiments of Shenfu coal water mixture[J]. Clean Coal Technology，2014，20(5)：36-39.（in Chinese））

[13] 任远. 高浓度水煤浆流动和阻力特性试验研究[D]. 南京：东南大学，2007.（RE Yuan. Slurry flow and resistance

properties of high concentration coal water[D]. Nanjing: Southeast University, 2007. (in Chinese))

[14] CRAWFORD B, WATTERSON J K, SPEDDING P L, et al. Wall slippage with siloxane gum and silicon rubbers[J]. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 2005, 129(1): 38-45.

[15] 刘宝林, 孔珑. 水煤浆流动特性及其流变模型确定方法综述[J]. 煤化工, 1995(4): 49-53. (LIU Baolin, KONG Long. A summary of flowing properties of coal-water slurry and determination of rheologic model thereof[J]. Coal Chemical Industry, 1995(4): 49-53. (in Chinese))

[16] 刘晓辉. 膏体流变行为及其管流阻力特性研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2015. (LIU Xiaohui. Rheological behavior of paste and its flow resistance characteristics[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2015. (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. Transport characteristics and spray characteristics of coal water paste and direct numerical simulation[D]. Nanjing: Southeast University, 2002. (in Chinese))

[18] 刘同有. 中国镍矿—金川镍矿充填采矿技术的发展[J]. 中国矿业, 1999, 8(5): 40-43. (LIU Tongyou. Development of backfill mining technology for China nickel ore-Jinchuan nickel mine[J]. China Mining Magazine, 1999, 8(5): 40-43. (in Chinese))

[19] 解海卫. 粉煤灰浓浆管道流动特性与阻力特性研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2004. (XIE Haiwei. Research on flow characteristics and resistance characteristics of fly ash slurry pipeline flow[D]. Beijing: University of North China Electric Power, 2004. (in Chinese))

Transport resistance characteristics of coal-water slurry considering effects of wall slip

WU You, CAO Bin, XIA Jianxin

(*College of Life and Environmental of sciences*, *Minzu University of China*, *Beijing* 100081, *China*)

Abstract: With the development of coal chemical industry, efficient and clean transportation of the coal has become a real research subject. Using pipelines to convey high concentration coal-water slurry has obvious advantages, such as less investment, energy saving and environmental protection. Research on the resistance characteristics of the coal-water slurry is of great significance to the conveying experiment design. Because small-diameter pipe experiment is more convenient to operate and save more materials, the small-diameter pipe is often used for simulation in the laboratory. The flow characteristics of high concentration coal-water slurry with the mass concentrations of 53% and 58% in the pipes with a diameter of 50, 47, 32, and 29 mm were tested in this study. The formula of rheological parameters for different flow regimes under the slip condition is derived, and the resistance coefficients of the coal-water slurry are obtained based on the analysis of the slip efficiency. The resistance of high concentration coal-water slurry is calculated using the calculation formula of homogeneous flow resistance. Compared with other formulas, the homogeneous flow formula is most consistent with the experimental results. The calculated results show that the rheological model of CWS conforms to the Herschel-Bulkey model. Under the conditions of the sliding effects, the relationship between the resistance coefficients of the high concentration coal-water slurry and the generalized Reynolds number can be expressed as a formula, and the resistance can be calculated by the homogeneous flow formula.

Key words: resistance coefficient; Reynolds number; coal-water slurry; resistance characteristics; pipe flow