



# 颗粒组分特性对稠密细颗粒固液两相流流动特性的影响

吴卫东, 王艳萍, 方 华, 陈伯周

(浙江理工大学机械与自动控制学院, 杭州 310018)

**摘 要:** 为进一步探讨旋转工况下稠密细颗粒固液两相流的流动特性, 分析颗粒浓度、粒径和剪切速率对固液两相流流动特性的影响, 以玻璃珠、水固液混合介质为研究对象, 首先分析了颗粒浓度和粒径对群体颗粒沉降速度的影响; 然后通过旋转流变仪测量了不同工况下流体的剪切应力与粘度, 在回归分析的基础上获得同一粒径下不同浓度流体的流变特性曲线和粘度曲线; 最后通过正交实验表( $L_8(4 \times 2^4)$ )分析了颗粒浓度、粒径、剪切速率对混合介质流变性能变化的影响。结果表明: 在旋转工况下, 稠密细颗粒固液两相流符合膨胀性非牛顿流体特征, 粘度与剪切速率呈递增指数关系, 流体粘度随颗粒粒径的增大而减小, 随颗粒浓度的增大而增大; 对混合介质流变性能影响最大的因素是颗粒体积浓度, 其次是粒径, 最后是剪切速率。

**关键词:** 固液两相流; 稠密细颗粒; 正交实验; 流动特性

**中图分类号:** TS195.644

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-3851(2020)01-0058-05

## Effect of particle composition characteristics on flow characteristics of dense fine particles solid-liquid two-phase flow

WU Weidong, WANG Yanping, FANG Hua, CHEN Bozhou

(Faculty of Mechanical Engineering & Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** In order to further investigate the flow characteristics of dense fine particles solid-liquid two-phase flow under rotating condition, and explore the influences of particle concentration, particle size and shear rate on the flow characteristics, the composite medium made up of glass beads and water was chosen to be investigated. The effects of particle concentration and particle size on the settlement velocity of group particles were firstly analyzed. Then, the shear stress and viscosity of the fluid under different working conditions were measured by a rotating rheometer, and the rheological characteristic curve and viscosity curve of the fluid with different concentrations under the same particle size were drawn on the basis of regression analysis. Finally, the influences of particle concentration, particle size and shear rate on rheological properties of mixed media were analyzed according to the orthogonal experimental table ( $L_8(4 \times 2^4)$ ). The results show that under the rotating conditions, the solid-liquid two-phase flow of dense fine particles conforms to the characteristics of expansive non-Newtonian fluid, and the viscosity has an increasing exponential relationship with the shear velocity. The fluid viscosity decreases with the increase of particle size and increases with the increase of particle concentration. The most important factor that affects the rheological properties of mixed media is particle concentration, followed by particle size, and finally shear rate.

**Key words:** solid-liquid two-phase flow; dense fine particles; orthogonal experiment; flow characteristics

收稿日期: 2019-03-01 网络出版日期: 2019-09-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(51676174)

作者简介: 吴卫东(1992-), 男, 河南信阳人, 硕士研究生, 主要从事固液两相流流动特性方面的研究。

通信作者: 王艳萍, E-mail: wangyp@zstu.edu.cn

## 0 引言

固液两相流问题普遍存在于环境、能源、化工、水利等领域<sup>[1-5]</sup>,如:环境领域中的固液两相污染物排放问题;能源及化工领域中的固液两相输送、混合、反应等问题;水利工程方面的水轮机磨损<sup>[6]</sup>、水沙运动、河床变化、管道输送、泵的输送效率及磨损等问题<sup>[7]</sup>。离心泵是固相物质水力输送的核心动力设备之一,固相颗粒的存在使得固液两相离心泵的效率 and 可靠性均低于相同结构的清水泵。在工程中发现,离心泵效率低下的问题在输送高浓度细颗粒(称之为稠密细颗粒)固液两相介质过程中表现得更加突出,其输送效率普遍偏低,能源的损耗相当大。研究固相颗粒对离心泵的内部流动特性和外特性的影响是提高固液两相离心泵性能的关键。但是由于固体颗粒的形状、大小、密度、在液相中的浓度等不同,再加上离心泵内部流道形状复杂和叶轮的转速较高等因素的共同作用,导致固液两相离心泵内部流场极其复杂。稠密固液两相流中流体相和颗粒相两相间是双相耦合,流体相影响颗粒的运动,颗粒相通过对动量和湍动能的消耗影响流体相,由于颗粒相浓度较高,颗粒和颗粒之间以及颗粒和壁面之间的碰撞较频繁,颗粒的运动不仅仅依靠液相带动,同时也受到颗粒自身的影响,稠密颗粒相在液相中的运动是液体拖拽、颗粒碰撞和液体湍流运输共同作用的结果。从材料学的角度来看,由于颗粒尺寸细小,其比表面积增加、细颗粒的小尺寸效应,一方面反映在固相体积浓度的增加上,另一方面反映在受液相作用力的影响增强上,同时对细颗粒来说,颗粒之间的碰撞、壁面对颗粒强约束作用等会引起颗粒的湍流扩散和局部团聚效应增强,从而使两相流问题更加复杂。

国内外研究者对高浓度下混合介质呈现的不同的流体特性进行了探究。Krieger 等<sup>[8]</sup>发现高浓度挟沙水流经常表现出非牛顿流体的特性。倪晋仁等<sup>[9-12]</sup>采用动理论对固液两相混合介质进行了研究,分析了高浓度固液两相流的主要微观运动特性(如颗粒运动速度分布函数变化)和宏观运动特性(如颗粒平均速度、颗粒脉动速度和单位体积颗粒数等),并得到了高浓度固液两相流中悬浮颗粒的垂直分布规律。马坤<sup>[13]</sup>通过实验测量,获得了大曲率方截面弯道内拟塑性非牛顿流体湍流的平均流场和压力脉动特性,为拟塑性流体湍流的数值计算研究提供了思路。Tang 等<sup>[14]</sup>运用积分形式的格子玻尔兹

曼方程对稠密流进行了大涡模拟研究,数值计算结果与实验结果吻合良好。杨猛<sup>[15]</sup>分别采用欧拉多相流模型和基于拉格朗日方法的离散相模型,对固体颗粒在湍流场中的沉降过程进行了预测。张士林<sup>[16]</sup>在原有的非均匀浆体速度与颗粒浓度分布模型上,修正了干涉力对固体颗粒速度的影响。王星等<sup>[17]</sup>测试了赤泥在 60% 浓度左右的流变特性,发现赤泥在管道中流动时表现出非牛顿假塑性流体的特性,其稠度系数和流动指数均随浓度的变化而发生较大的变化。熊楚安<sup>[18]</sup>通过研究发现,煤浆的表现粘度与煤浆的质量分数之间呈指数增长型关系。安卓卿等<sup>[19]</sup>研究发现,当蓖麻油中颗粒含量大于 15% 时,颗粒流体为伪塑性非牛顿流体。综上可知,高浓度下颗粒组分会影响混合介质的流动特性,当固体颗粒浓度超过一定阈值后颗粒运动的微观和宏观特性均会发生变化,其流动呈现非牛顿流体特性。

稠密细颗粒固液两相流与稀疏固液两相流的宏观性质和微观机理截然不同,由于稠密细颗粒固液两相流动情况复杂,颗粒细小,影响因素较多,且在数值计算时较少考虑固液两相流的流变特性,这使得数值计算结果与实际情况相差较大,无法得到令人满意的结果。为了提高稠密细颗粒固液两相流仿真结果的准确性,有必要考虑其流动过程中的流变特性,因此本文利用旋转流变仪,采用正交实验的方法,系统地考察了固相颗粒浓度、粒径、剪切速率 3 个因素对稠密细颗粒流变特性的影响,明确影响稠密细颗粒固液两相流流变特性的主要因素,为进一步深入开展稠密细颗粒固液两相流的理论和实验研究提供参考。

## 1 实验部分

实验以玻璃珠-水为研究对象,首先利用颗粒沉降速度小的特点,将一定体积的细颗粒加入到装有水的烧瓶中,搅拌均匀。由沉降速度分析可知,高浓度细颗粒的混合介质可视为均匀悬浮液。然后将配制好的混合介质加入到烧杯中,再采用 Anton Paar MCR52 旋转流变仪测量不同剪切速率下的粘度、剪切应力。实验工况见因素水平表 1。

表 1 因素水平表

实验号	X: 浓度 $\omega/\%$	Y: 粒径 $D/\text{mm}$	Z: 剪切速率 $\gamma/\text{s}^{-1}$
1	25	0.10	1000~2000
2	35	0.05	1000~4000
3	45	—	—
4	55	—	—

根据因素和水平的个数,确定选用  $L_8(4 \times 2^4)$  正交表分析颗粒浓度(X)、粒径(Y)、剪切速率(Z)对混合介质流变性能变化的影响,实验方案如表2所示。

表2 实验方案  $L_8(4 \times 2^4)$

试验号	X	Y	Z	实验方案
实验一	1	1	1	$X_1 Y_1 Z_1$
实验二	1	2	2	$X_1 Y_2 Z_2$
实验三	2	1	1	$X_2 Y_1 Z_1$
实验四	2	2	2	$X_2 Y_2 Z_2$
实验五	3	1	2	$X_3 Y_1 Z_2$
实验六	3	2	1	$X_3 Y_2 Z_1$
实验七	4	1	2	$X_4 Y_1 Z_2$
实验八	4	2	1	$X_4 Y_2 Z_1$

注:表中1、2、3、4分别对应各因素的每一水平,以下同。

## 2 结果与讨论

### 2.1 沉降速度分析

在固液两相流动过程中,由于颗粒的自重、流体的粘性作用等因素使颗粒发生沉降,从而导致两相流的理论浓度和真实浓度之间存在差异,这一问题直接影响两相流数值仿真及理论分析结果的准确性,同时沉降速度也是两相流输送工艺设计的重要参数。

采用式(1)~(2)计算群体颗粒沉降速率:

$$V_h/V_t = (1 - \omega)^n \quad (1)$$

$$n = 4.7 \frac{1 + 0.15Rep^{0.687}}{1 + 0.253Rep^{0.687}} \quad (2)$$

式中: $V_h$ 为群体沉降速度,m/s; $V_t$ 为固体颗粒的自由沉降速度,m/s; $\omega$ 为体积浓度,%; $n$ 为颗粒雷诺数的函数; $Rep$ 为颗粒雷诺数。

根据 Swanson 公式<sup>[16]</sup>可得:0.10 mm 粒径玻璃砂的  $V_t = 7.75 \times 10^{-3}$  m/s,  $Rep = 0.86$ ; 0.05 mm 粒径玻璃砂  $V_t = 2.08 \times 10^{-3}$  m/s,  $Rep = 0.116$ 。计算结果见表3。

表3 群体颗粒沉降速率表

颗粒粒径 $D/\text{mm}$	浓度 $\omega/\%$	群体颗粒沉降速率计 算值 $V_h/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
0.05	25	$0.55 \times 10^{-3}$
	35	$0.28 \times 10^{-3}$
	45	$0.13 \times 10^{-3}$
	55	$0.05 \times 10^{-3}$
0.10	25	$2.22 \times 10^{-3}$
	35	$1.19 \times 10^{-3}$
	45	$0.57 \times 10^{-3}$
	55	$0.24 \times 10^{-3}$

由计算结果可知,0.10 mm 颗粒的沉降速度大于 0.05 mm 颗粒的沉降速度。相同颗粒尺寸条件

下,颗粒的沉降速度随颗粒浓度的提高而降低。当 0.05 mm 颗粒的浓度达到 50% 时,其沉降速率几乎为零,固体颗粒基本属于悬浮状态。在本实验中,因为颗粒尺寸小、浓度大,因此两相流中的固相颗粒在流场中的分布可看作是均匀的,在后续实验中其实际浓度按理论浓度处理。

### 2.2 颗粒浓度对混合介质流变特性的影响

根据实验测量出在相同工况、不同剪切速率下的剪切应力,绘制出不同浓度下的混合介质的流变曲线,如图1~图2所示。

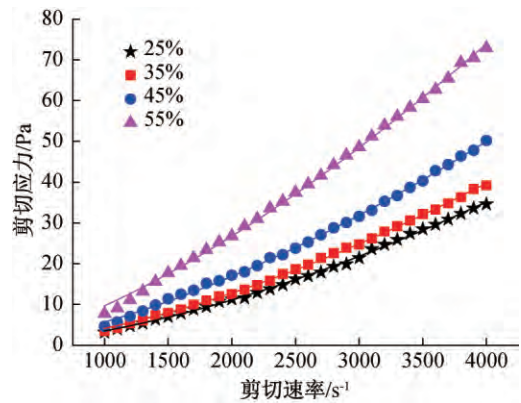


图1 0.05 mm 粒径混合介质在不同浓度下的流变曲线

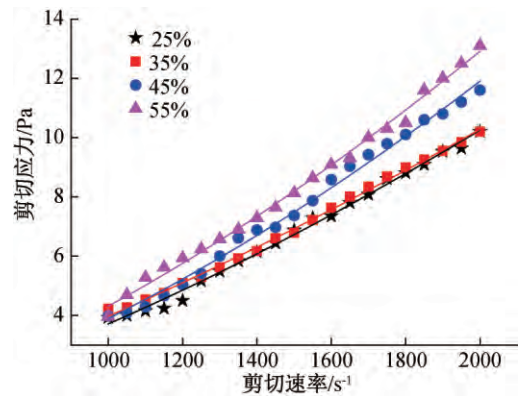


图2 0.10 mm 粒径混合介质在不同浓度下的流变曲线

本文采用了幂律流体模型,即

$$\tau = k\gamma^m \quad (3)$$

式中: $\tau$ 为剪切应力,Pa; $\gamma$ 为剪切速率, $\text{s}^{-1}$ ;  $k$ 为稠度系数; $m$ 为流动指数。

对实验数据进行回归分析,分别得到 0.05、0.10 mm 粒径下不同浓度混合介质的流变特性曲线回归方程,见表4、5。

表4 0.05 mm 粒径混合介质流变曲线回归方程

$\omega/\%$	流变方程	$R^2$
25	$\tau = 3.687 \times 10^{-5} \gamma^{1.660}$	0.999
35	$\tau = 5.223 \times 10^{-5} \gamma^{1.633}$	0.999
45	$\tau = 11.554 \times 10^{-5} \gamma^{1.565}$	0.999
55	$\tau = 38.703 \times 10^{-5} \gamma^{1.466}$	0.999

表 5 0.10 mm 粒径混合介质流变曲线回归方程

$\omega/\%$	流变方程	$R^2$
25	$\tau=15.030\times10^{-5}\gamma^{1.464}$	0.994
35	$\tau=30.609\times10^{-5}\gamma^{1.371}$	0.997
45	$\tau=5.724\times10^{-5}\gamma^{1.611}$	0.993
55	$\tau=7.769\times10^{-5}\gamma^{1.581}$	0.995

由图 1、2 和表 4、5 可以发现,由玻璃珠与水配制的混合介质,其流变特性符合幂律流体特征。实验结果表明流动指数  $n$  均大于 1,因此判定玻璃珠与水的混合介质在高速旋转工况下,其流体特征为膨胀体。同一粒径下,混合介质的剪切应力值  $\tau$  随着剪切速率  $\gamma$  的增大而增大;而且颗粒浓度  $\omega$  越大,混合介质的稠度系数  $k$  越大,粘度越大。相同浓度下,含大颗粒的混合介质的稠度系数、粘度大于含小颗粒的混合介质。

### 2.3 颗粒浓度对混合介质粘度的影响

根据实验测量出在不同工况下混合介质的粘度,绘制出不同浓度下混合介质的粘度曲线,如图 3、4 所示。粘度曲线的拟合方程为:

$$\mu=A\exp(B\gamma)+C \quad (4)$$

式中: $\mu$  为动力粘度,Pa·s; $A$ 、 $B$ 、 $C$  为回归参数。对实验数据进行回归,分别得到 0.05、0.10 mm 粒径下不同浓度的粘度曲线回归方程,见表 6、7。

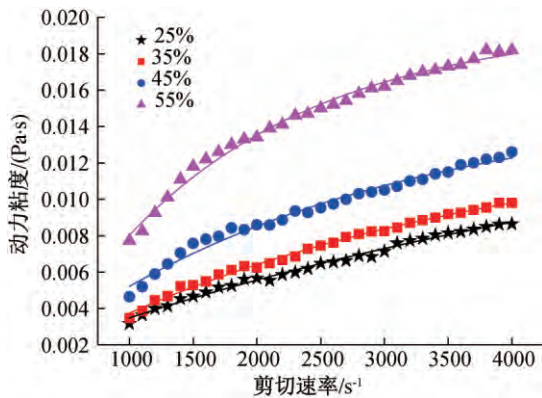


图 3 0.05 mm 粒径混合介质在不同浓度下的动力粘度曲线

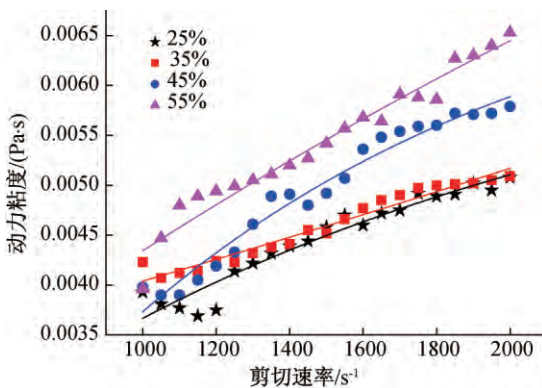


图 4 0.10 mm 粒径混合介质在不同浓度下的动力粘度曲线

表 6 0.05 mm 粒径混合介质粘度曲线拟合参数

变 量	浓度 $\omega$			
	25%	35%	45%	55%
A	-Q 0151	-Q 0137	-Q 0151	-Q 0221
B	-1.8060 $\times10^{-4}$	-3.0914 $\times10^{-4}$	-3.9000 $\times10^{-4}$	-6.4085 $\times10^{-4}$
C	Q 0161	Q 0138	Q 0155	Q 0197
$R^2$	Q 9916	Q 9946	Q 9830	Q 9910

表 7 0.10 mm 粒径混合介质流变曲线回归方程

变 量	浓度 $\omega$			
	25%	35%	45%	55%
A	-Q 0058	Q 0102	-Q 0088	-Q 0129
B	-6.2046 $\times10^{-4}$	9.6154 $\times10^{-4}$	-8.6060 $\times10^{-4}$	-2.2923 $\times10^{-4}$
C	Q 0068	-Q 0072	Q 0075	Q 0146
$R^2$	Q 9280	Q 9543	Q 9646	Q 9548

由图 3—图 4 得出,玻璃珠、水的混合介质粘度随着剪切速率的增加而增大,这是由于剪切速率增大时流体内部颗粒的动能增加,颗粒间相互作用更加明显,流体内部摩擦增大,而粘度是流体粘滞性的一种量度,是流体流动力对其内部摩擦现象的表征,内摩擦越大粘度越大。同一粒径下,颗粒浓度越高流体内部颗粒数量越多,颗粒间相互作用次数更加频繁,因此相应粘度值越高;相同浓度下,颗粒粒径越大颗粒数量越少,颗粒间相互作用次数减少,因此相应粘度值越小。

### 2.4 混合介质流变性能的影响因素分析

根据因素水平表 1,选用正交表  $L_8(4\times2^4)$  来分析实验,结果及极差分析见表 8。

表 8 实验结果及极差分析

实验号	X	Y	Z	粘度/(MPa·s)
实验一	1	1	1	4.22
实验二	1	2	2	5.67
实验三	2	1	1	4.32
实验四	2	2	2	6.25
实验五	3	1	2	5.79
实验六	3	2	1	6.45
实验七	4	1	2	6.53
实验八	4	2	1	10.10
$K_1$	9.89	20.86	25.09	
$K_2$	10.57	28.47	24.24	
$K_3$	12.24			
$K_4$	16.63			
$k_1$	4.94	5.21	6.27	
$k_2$	5.28	7.12	6.06	
$k_3$	6.12			
$K_4$	8.31			
极差 R	3.37	1.91	0.21	
因素主次				X Y Z

8组样品的粘度测试及极差分析结果如表8所示,实验结果显示颗粒浓度越高、粒径越小,则粘度值越大。对极差 $R$ 分析的结果表明:浓度,粒径,剪切速率3个因素中,对粘度影响最大的是浓度( $R=3.37$ ),其次是粒径( $R=1.91$ ),最后是剪切速率( $R=0.21$ )。

### 3 结 论

本文通过对玻璃珠、水混合介质两相流中固体颗粒的群体沉降速度分析以及流变性能测试,得到了颗粒浓度、粒径以及剪切速率对其流动特性的影响规律,并通过正交实验分析了影响混合介质流变特性因素的主次关系,结论如下:

a) 颗粒浓度越高、粒径越小,混合介质中颗粒的悬浮、分散性能就越好,其理论浓度越接近于实际浓度。

b) 在旋转工况下,混合介质的流变特性基本符合幂律流体模型,根据拟合结果可知流变指数 $n > 1$ ,因此该流动属于膨胀性非牛顿流体。

c) 在本实验条件下混合介质的粘度随剪切速率和浓度的增大而增大,且粘度与剪切速率间呈现递增指数关系。

d) 正交实验的极差分析结果表明固相颗粒浓度的影响最大,其次是粒径,最后是剪切速率。

本文着重分析了固相颗粒浓度对剪切应力和粘度的影响,粒径和剪切速率对粘度影响的实验数据较少,后续工作中将补充实验,进一步完善拟合分析结果,确定流体流动特性发生改变的浓度临界点以及浓度与粘度之间的关联关系。

### 参考文献:

- [1] 牟介刚,王浩帅,吴登昊,等. 污水自吸泵固液两相流非定常研究[J]. 浙江工业大学学报, 2018, 46(6): 633-638.
- [2] 崔巧玲,李映,金守泉. 非定常固液两相流对双流道泵磨损性能的影响[J]. 浙江理工大学学报, 2012, 29(4): 543-548.
- [3] 马晓阳,武传宇,陈洪立,等. 水平 $90^\circ$ 弯管内固液两相流动的数值模拟[J]. 浙江理工大学学报, 2014, 31(3): 228-234.
- [4] 何伟强,李映,张玉良,等. 固相体积分数对泵性能影响研究[J]. 浙江理工大学学报, 2010, 27(4): 575-579.
- [5] 方向阳,邵春雷,杨勇. 熔盐泵盐析两相流冷态模型试验和数值研究[J]. 航空动力学报, 2018, 33(6): 1403-1411.
- [6] 卢金玲,张欣,王维,等. 沙粒粒径对水力机械材料磨蚀性能的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(22): 53-60.
- [7] 李文锋,冯建军,朱国俊,等. 基于CFD的固液两相离心泵内部流动及磨蚀特性研究[J]. 西安理工大学学报, 2017(1): 46-52.
- [8] Krieger I M, Dougherty T J. A mechanism for non-Newtonian flow in suspensions of rigid spheres[J]. Transactions of the Society of Rheology, 1959(3): 137-152.
- [9] 倪晋仁,黄湘江. 高浓度固液两相流的运动特性研究[J]. 水利学报, 2002, 33(7): 8-15.
- [10] 倪晋仁,王光谦,张红武. 固液两相流基本理论及其最新应用[M]. 北京: 科学出版社, 1991: 38-254.
- [11] 倪晋仁,王光谦. 高浓度恒定固液两相流运动机理探析: I. 理论[J]. 水利学报, 2000(5): 22-26.
- [12] Ni J R, Wang G Q, Borthwick A G L. The kinetic theory for vertical profile of particle concentration in dilute and dense solid-liquid flows[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000, 126(12): 893-903.
- [13] 马坤. 大曲率弯道中拟塑性非牛顿流体的湍流流动研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2016: 83-96.
- [14] Tang X L, Wu J. An improved LES on dense particle-liquid turbulent flows using integrated boltzmann equations [J]. Canadian Journal of Chemical Engineering, 2007, 85: 137-150.
- [15] 杨猛. 计算流体力学两相流流动的模拟及两相流模型的研究[D]. 天津: 天津大学, 2005: 50-68.
- [16] 张士林. 沉降性浆体速度与浓度分布耦合模型及迁移速度研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2005: 29-31.
- [17] 王星,赵学义,瞿圆媛,等. 高浓度赤泥颗粒特性和流变特性的试验研究[J]. 金属矿山, 2008(1): 107-109.
- [18] 熊楚安. 煤浆浓度对油煤浆流变特性和表观黏度的影响[J]. 黑龙江科技学院学报, 2012, 22(3): 237-240.
- [19] 安卓卿,张延玲,李琦,等. 固体颗粒含量和形状对流体黏度的影响[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2015, 20(1): 46-52.

(责任编辑:康 锋)