

# 基于正交试验的磨料浆体流变特性

刘国勇<sup>1</sup>, 宋 鸣<sup>1</sup>, 张莹娜<sup>2</sup>, 蔡阿云<sup>3</sup>, 孔 宁<sup>1</sup>, 朱冬梅<sup>1</sup>, 张少军<sup>1</sup>

(1. 北京科技大学 机械工程学院, 北京 100083; 2. 中国石油工程建设有限公司, 北京 100101;  
3. 北京首钢冷轧薄板有限公司, 北京 101304)

**摘要** :立足于磨料浆体射流在除鳞领域的应用,通过设计正交试验,对磨料浆体的流变参数进行测量,研究不同因素对 2 种磨料浆体流变特性的影响效应。结果表明,对于石榴石磨料浆体,聚丙烯酰胺(PAM)质量浓度对磨料浆体黏度的影响最为显著,磨料质量浓度次之,磨料粒径对磨料浆体黏度无明显影响。对于钢砂磨料浆体,PAM 质量浓度对磨料浆体黏度有显著影响,磨料质量浓度和磨料粒径对磨料浆体黏度无明显影响。利用幂律模型、Bingham 模型及 Herschel-Bulkley 模型对实验测得的流变参数进行拟合,优选出 Herschel-Bulkley 模型作为描述磨料浆体流变特性的最佳模型,建立了其本构方程,得出磨料浆体的流变特性规律。

**关键词** :磨料浆体;聚丙烯酰胺;流变特性;本构方程

中图分类号 :O373 文献标志码 :A

文章编号 :1008-5548(2018)02-0026-06

## Rheological properties research of abrasive suspension based on orthogonal experiment

LIU Guoyong<sup>1</sup>, SONG Ming<sup>1</sup>,

ZHANG Yingna<sup>2</sup>, CAI Ayun<sup>3</sup>,

KONG Ning<sup>1</sup>, ZHU Dongmei<sup>1</sup>, ZHANG Shaojun<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. China Petroleum

Engineering & Construction Corp, Beijing 100101, China;

3. Beijing Shougang Cold Rolling Co. Ltd., Beijing

101304, China)

**Abstract**: The effects of different factors on the rheological properties of abrasive suspension were experimentally conducted by measuring the rheological parameter of abrasive suspension, which polyacrylamide (PAM), garnet and steel grit were selected

as additive and abrasive respectively in the field of descaling of abrasive suspension jet. The results show that, abrasive concentration and abrasive grit have little influence on the viscosity of suspension. The garnet and steel grit, abrasive slurry viscosity change curves have almost the same rule which the viscosity decreases with the shearing rate increasing. The measured data were fitted using power-law model, Bingham model and Herschel-Bulkley model. It is found that Herschel-Bulkley model is more accurate to describe rheological properties of two kinds of abrasive slurry. Based on Herschel-Bulkley model, the constitutive equations are established and rheological law is obtained.

**Keywords**: abrasive suspension; polyacrylamide; rheological property; constitutive equation

磨料浆体射流除鳞是一种新的除鳞方法,近几年逐渐得到应用。这种射流浆体是将磨料、水及高聚物添加剂等按一定的比例混合配制,浆体中高聚物添加剂的存在,有助于磨料的凝聚和悬浮,减小射流过程中磨料的阻力,提高磨料浆体射流的除鳞效果。

Hollinger 等<sup>[1]</sup>在 1989 年首次公开发表关于磨料浆体射流论文,推荐了几种悬浮液制备方法。Andrzej<sup>[2]</sup>针对磨料浆体射流在切割方面的应用,采用正交试验法对射流切割的工艺参数进行优化,得到了最优的工艺参数。Kim 等<sup>[3]</sup>对旋转喷嘴的磨料浆体射流在破岩方面的应用进行了研究,他们发现喷嘴旋转速度越小,破岩效果越好。刘小建<sup>[4]</sup>通过射流切割试验,研究膨润土作为添加剂的新磨料浆料对切割性能的影响,通过对磨料浆体射流与前混合磨料水射流在切割性能上的试验比较,揭示了磨料浆体切割性能的优势所在。廖兴斌<sup>[5]</sup>研究了磨料质量浓度、粒径等因素对浆体的流体力学特性的影响。杨佩旋<sup>[6]</sup>提出了以聚丙烯酰胺(PAM)为添加剂的磨料浆体的 4 个性能评价指标,通过实验研究磨料浆体的主要成分对 4 个性能评价指标的影响。孔祥平等<sup>[7]</sup>通过测定 PAM 水溶液不同状态下的表观黏度,研究质量浓度、剪切速率和温度对 PAM 水溶液流变特性的影响。目前,对于以 PAM 作为添加剂,石榴石和钢砂作为磨料的磨料浆体的流

收稿日期 2017-07-20, 修回日期 2018-01-21。

基金项目 :国家自然科学基金项目,编号 51605026;中央高校基本科研业务费专项资金资助项目,编号 FRF-TP-15-082A1。

第一作者简介 刘国勇(1969—)男,博士,副教授,硕士生导师,研究方向为金属材料控冷强韧化。E-mail gy\_liu666@ustb.edu.cn。

通信作者简介 宋鸣(1993—)男,硕士研究生,研究方向为金属材料控冷强韧化。E-mail ustb\_songm@163.com。

变特性的研究,没有公开文献发表。本文立足于磨料浆体射流在除鳞领域的应用,以 PAM 为添加剂,石榴石和钢砂为磨料,通过实验对磨料浆体的流变参数进行测量,基于正交试验,研究 PAM 溶液浓度、磨料粒径、磨料质量浓度对磨料浆体流变性能的影响,为磨料浆体配方、工艺的设计提供基础数据。拟建立磨料浆体的本构方程,探索磨料浆体的流变特性规律,为研究磨料浆体射流流场特性提供依据。

## 1 浆料的配制

磨料浆体是将特定粒径的磨料、特定浓度的高聚物添加剂、一定比例的水等混合配制而成的。

### 1.1 磨料浆体中添加剂的选择

磨料浆体射流除鳞使用的磨料的平均密度大于水。如果不做任何处理,磨料入水之后会迅速下沉,使得磨料浆体的浓度变化幅度大。添加剂的使用是为了增强流体对磨料的悬浮作用,降低磨料的下沉速度,让磨料尽可能长时间的悬浮在浆体中,保证磨料浆体的浓度变化幅度较小。

目前,国内外有关磨料浆体射流的研究主要以 PAM 作为高聚物添加剂。研究指出,PAM 具有良好的凝聚性,当溶液中 PAM 的质量浓度  $\rho_{\text{PAM}}=2 \text{ g/L}$  时,则每个聚合物单位能结合 13 个或 14 个水分子,最后形成高分子链状物包裹住水分子和磨料粒子,促使浆体形成凝聚射流<sup>[8-9]</sup>。

### 1.2 磨料浆体中磨料的选择

磨料浆体射流除鳞过程中,带钢表面氧化铁皮的去除,主要依靠磨料对带钢表面的冲击。目前常用的磨料有石榴石、碳化硅、白刚玉、钢砂等,它们的物性参数<sup>[10-12]</sup>见表 1。

表 1 常用磨料的物性参数

Tab. 1 physical parameter of common abrasive

名称	密度/( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	莫氏硬度值
石榴石	3.4~4.3	7.5~7.9
碳化硅	3.2	9.15
白刚玉	3.90	9
钢砂	7.7	14

由于碳化硅、石榴石、白刚玉的密度和硬度比较接近,因此,本文中将石榴石和钢砂两种材料作为磨料,对磨料浆体流变特性进行研究。

## 2 磨料浆体流变参数的测量实验

本文中对磨料浆体流变参数的测量主要是偏重于表观黏度与剪切速率的关系。

### 2.1 流变参数测量实验

#### 2.1.1 测量实验条件

本文采用旋转黏度计测量磨料浆体的流变参数,黏度计型号为 NDJ-1。

实验均在室温  $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$  下进行。由于配制的磨料浆体温度不高,基本在室温  $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$  左右,因此未研究不同温度对磨料浆体黏度的影响。

#### 2.1.2 测量实验步骤

1) 利用电子秤称重不同质量的 PAM 颗粒,按照质量浓度分别为 2、4、6、9 g/L 配制 PAM 溶液。

2) 使用 NDJ-1 型黏度计测量 PAM 溶液在不同质量浓度、不同剪切速率下的黏度。

3) 优选出最适宜的 PAM 溶液的质量浓度,使用石榴石作为磨料,分别按照磨料粒径为 178、250、420、590  $\mu\text{m}$  配制磨料浆体,并测量磨料浆体在不同磨料粒径、不同剪切速率下的黏度,研究磨料粒径对磨料浆体黏度的影响。

4) 分别使用石榴石和钢砂作为磨料,按照 200、300、400 g/L 的磨料质量浓度配制磨料浆体,并测量磨料浆体在不同磨料质量浓度、不同剪切速率下的黏度,研究磨料质量浓度对磨料浆体黏度的影响。

### 2.2 测量实验结果及分析

#### 2.2.1 PAM 溶液黏度的测量结果及分析

配制 PAM 溶液的质量浓度  $\rho_{\text{PAM}}$  分别为 2、4、6、9 g/L,4 种不同浓度的 PAM 溶液的黏度曲线如图 1 所示。

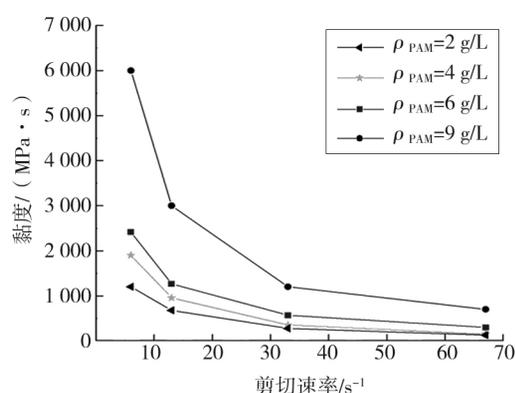


图 1 不同浓度 PAM 溶液的黏度曲线

Fig. 1 Viscosity curves of different concentration PAM solution

从图中可以看出,4 种浆体均符合非牛顿流体的黏度变化特征,其表观黏度随着剪切速率的增大而减小,且随着 PAM 浓度升高,降低幅度增加。这是因为剪切速率增加导致高分子间的网状结构被破坏,缠结数目下降,表观黏度减小,故在相同的剪切速率下,PAM 质量浓度越高,高分子间的网状结构破坏程度越

大,黏度下降的幅度越大。

此外,在同一剪切速率下,PAM 溶液的表观黏度与溶液质量浓度成正比,溶液的质量浓度增大,表观黏度会随之增大,且增加幅度随着剪切速率的提高而减小。这是因为 PAM 质量浓度增加,高分子之间相互缠绕程度提高,缠结点数目上升,表观黏度增大。剪切速率越小,高分子间的网状结构破坏程度越小,黏度增加的幅度也就越大。

当  $\rho_{PAM}=9\text{ g/L}$  时,PAM 溶液的表观黏度会显著增大,考虑到溶液的阻力会因黏滞力的增大而增大,阻力增大相应地会导致 PAM 的絮凝效果减弱。因此在本实验条件下,选取质量浓度为  $6\text{ g/L}$  的 PAM 溶液作为添加剂。

### 2.2.2 磨料粒径对磨料浆体黏度的影响

为研究不同磨料粒径对磨料浆体黏度的影响,使用  $\rho_{PAM}=6\text{ g/L}$  的 PAM 溶液,添加不同粒径的石榴石磨料,磨料质量浓度均为  $200\text{ g/L}$ ,测定磨料浆体的黏度,测量结果如图 2 所示。

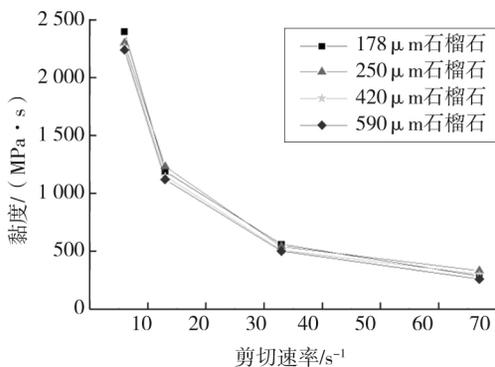


图 2 不同石榴石粒径磨料浆体的黏度曲线

Fig. 2 Viscosity of abrasive suspension with different abrasive grit

由图可以看出,不同磨料粒径的磨料浆体黏度曲线基本相同,磨料粒径对磨料浆体黏度的影响较小。根据斯托克斯公式,颗粒的沉降速度与其粒径的平方成正比,磨料粒径越小,布朗运动越剧烈,磨料沉降越慢,磨料越容易悬浮在浆体<sup>[10]</sup>。因此从保持磨料浆体悬浮性方面考虑,本文中研究的 2 种磨料(石榴石和钢砂)的粒径均选取为  $178\text{ }\mu\text{m}$ 。

### 2.2.3 磨料质量浓度对磨料浆体黏度的影响

使用  $\rho_{PAM}=6\text{ g/L}$  的 PAM 溶液,分别采用石榴石和钢砂作为磨料,按照  $200、300、400\text{ g/L}$  质量浓度配制磨料浆体,进行黏度测量,测量结果如图 3 和图 4 所示。

由图 3、4 可以看出,对于同一种磨料,加入不同浓度的磨料并没有使浆体的黏度发生明显变化。另

外,对于不同种磨料,石榴石磨料浆体和钢砂磨料浆体的黏度曲线变化规律大致相同,浆体黏度均随着剪切速率增大而减小。

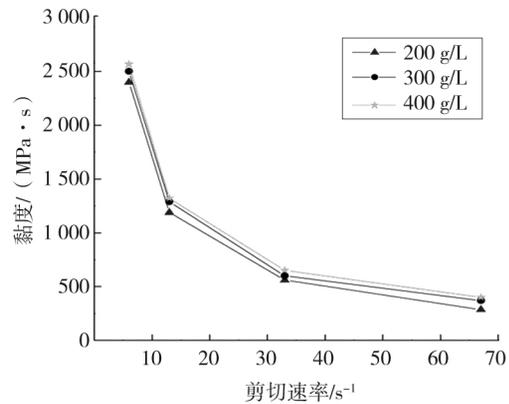


图 3 不同石榴石浓度磨料浆体的黏度曲线

Fig. 3 Viscosity curves of abrasive suspension with different garnet concentration

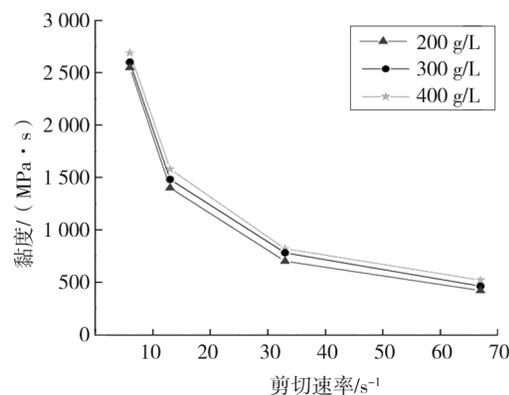


图 4 不同钢砂浓度磨料浆体的黏度曲线

Fig. 4 Viscosity curves of abrasive suspension with different steel grit concentration

## 3 正交试验设计及结果分析

### 3.1 石榴石磨料浆体的正交试验

#### 3.1.1 正交试验的设计

为了综合考察各影响因素对石榴石磨料浆体黏度的影响效应,选取 PAM 溶液黏度、磨料质量浓度、磨料粒径作为试验的 3 种影响因素,每个因素设定 4 个水平,见表 2。采用  $L_9(3^4)$  正交表安排一个 3 因素 4 水平的正交试验。

正交试验极差分析结果如表 3 所示,以剪切速率为  $6\text{ s}^{-1}$  时的磨料浆体黏度作为评价指标,表中 A、B、C 为 3 种影响因素,D 为误差列。 $K_1、K_2、K_3$  分别为各对应列(因素)上 1、2、3 水平效应的磨料浆体黏度之

和  $R$  为各对应列(因素)的极差。

表 2 正交试验因素与水平表  
Tab. 2 Data sheet of orthogonal test factors and levels

水平	A PAM 质量浓度/ ( $g \cdot L^{-1}$ )	B 磨料质量浓度/ ( $g \cdot L^{-1}$ )	C 磨料粒径/ $\mu m$
1	2	200	420
2	4	300	250
3	6	400	178

表 3 正交试验极差分析结果  
Tab. 3 Data sheet of orthogonal test and results

影响因素	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$R$
A	3 885	5 770	7 465	3 580
B	5 398	5 688	6 034	636
C	5 770	5 655	5 695	115
D(误差)	5 667	5 756	5 697	89

### 3.1.2 正交试验结果分析

1)直观分析。由表 3 可知,因素 A、B、C 的极差分别为 3580、636、115,由此可以初步得到 PAM 溶液黏度对磨料浆体的黏度影响幅度最大,磨料质量浓度次之,磨料粒径影响效果最小。

2)方差分析。正交试验的直观分析法简单直观,计算量小,但不能计算误差的大小,不能精确地估算各因素对试验结果影响的显著程度。因此需要对结果进行方差分析,正交试验的方差分析计算结果如表 4 所示。

表 4 方差分析表  
Tab. 4 Analysis of variance

因素	偏差平方和	自由度	均方差	$F$ 值	显著性
A	2 138 072.3	2	1 069 036	1 564.4	**
B	67 590.3	2	33 795.2	49.5	*
C	2 272.3	2	1 136.2	1.66	
D(误差)	1 366.7	2	683.4		

注  $F_{0.01}(2, 2)=99$ ,  $F_{0.05}(2, 2)=19$ ,  $F_{0.1}(2, 2)=9$ ; \*\* 表示非常显著, \* 表示有一定的影响

对于 PAM 质量浓度,因  $F > F_{0.01}(2, 2)$ ,故该因素对试验结果有非常显著的影响,记做“\*\*”;对于磨料质量浓度,由于  $F_{0.05}(2, 2) > F > F_{0.1}(2, 2)$ ,因此该因素对试验结果有一定的影响,记做“\*”;对于磨料粒径,

$F < F_{0.1}(2, 2)$ ,所以该因素对试验结果没有显著影响,不做标记。

由方差分析可得到如下结论:PAM 质量浓度对石榴石磨料浆体黏度的影响效果最为显著,磨料质量浓度次之,磨料粒径对石榴石磨料浆体黏度没有明显影响。这与直观分析得到的结论是一致的。

## 3.2 钢砂磨料浆体的正交试验

### 3.2.1 正交试验的设计

采用同样的方法,综合考察 PAM 质量浓度、磨料质量浓度、磨料粒径 3 种影响因素对钢砂磨料浆体黏度的影响效应,每个因素设定 4 个水平,如表 2 所示。采用  $L_9(3^4)$  正交表安排一个 3 因素 4 水平的正交试验。

正交试验极差分析结果如表 5 所示,以剪切速率为  $6 s^{-1}$  时的磨料浆体黏度作为评价指标,表中 A、B、C 为 3 种影响因素,D 为误差列。 $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$  分别为各对应列(因素)上 1、2、3 水平效应的磨料浆体黏度之和, $R$  为各对应列(因素)的极差。

表 5 正交试验结果

Tab. 5 Data sheet of orthogonal test and results

影响因素	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$R$
A	4 750	6 290	7 999	3 249
B	6 180	6 230	6 620	431
C	6 310	6 469	6 260	209
D(误差)	6 290	6 300	6 449	159

### 3.2.2 正交试验结果分析

1)直观分析。对试验结果进行分析,因素 A、B、C 的极差分别为 3 249、431、209,由此可以初步得到 PAM 质量浓度对磨料浆体的黏度影响幅度最大,磨料质量浓度次之,磨料粒径影响效果最小。

2)方差分析。正交试验的方差分析计算结果如表 6 所示。

表 6 方差分析结果

Tab. 6 Analysis of Variance

因素	偏差平方和	自由度	均方差	$F$ 值	显著性
A	1 760 920	2	880 460	333	**
B	37 726.9	2	18 863.5	7.13	
C	7 940.2	2	3970	1.5	
D(误差)	5 286.9	2	2 643.5		

注  $F_{0.01}(2, 2)=99$ ,  $F_{0.05}(2, 2)=19$ ,  $F_{0.1}(2, 2)=9$ ; \*\* 表示非常显著, \* 表示有一定的影响

对于 PAM 质量浓度  $F > F_{0.01}(2, 2)$  ,所以该因素对试验结果有非常显著的影响 ,记做“\* \*” ,对于磨料质量浓度  $F < F_{0.1}(2, 2)$  ,所以该因素对试验结果没有显著影响 ,不做标记 ;对于磨料粒径  $F < F_{0.1}(2, 2)$  ,所以该因素对试验结果没有显著影响 ,不做标记。

由方差分析可得到如下结论 :PAM 质量浓度对钢砂磨料浆体黏度的影响效果最为显著 ,磨料质量浓度和磨料粒径对钢砂磨料浆体黏度没有明显影响。这与直观分析得到的结论是一致的。

#### 4 磨料浆体本构方程研究

磨料浆体射流流场控制方程的建立及是否能准确描述其流场特征 ,很大程度上依赖于磨料浆体本构方程的准确与否 ,因此建立本构方程 ,对于研究磨料浆体流变特性具有重要的意义。

对本文中的磨料浆体 ,采用  $\rho_{PAM}=6 \text{ g/L}$  的 PAM 溶液作为添加剂 ,磨料质量浓度为  $200 \text{ g/L}$  的石榴石和钢砂作为磨料 ,测定得到的磨料浆体的流变曲线如图 5 所示。

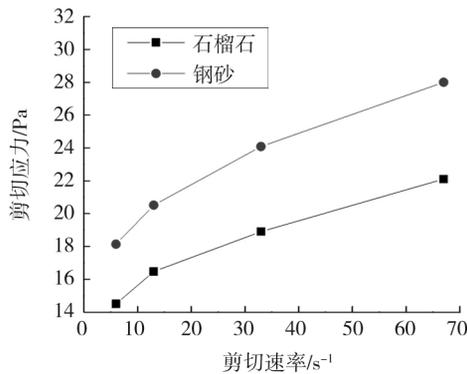


图 5 磨料浆体的流变曲线  
Fig. 5 Rheological curves of abrasive suspension

磨料浆体在理论上属于广义牛顿流体 ,即纯黏性非牛顿流体 ,目前 ,可近似描述纯黏性非牛顿流体流变特性的本构方程模型<sup>[13-15]</sup>有 3 种 ,即

1) 幂律模型。主要用于描述拟塑性流体的流变性 ,其数学表达式为

$$\tau = K\dot{\gamma}^n \quad (1)$$

2) Bingham 模型。主要用于描述塑性流体的流变特性 ,其数学表达式为

$$\tau = \tau_y + \eta_p \dot{\gamma} \quad (2)$$

3) Herschel-Bulkley 模型。主要用于描述屈服应力较高的溶液 ,其数学表达式为

$$\tau = \tau_y + K\dot{\gamma}^n \quad (3)$$

式(1)–(3)中  $\tau$  为剪切应力 , $\dot{\gamma}$  为剪切速率 , $\tau_y$  为屈服应力 , $\eta_p$  为塑性黏度 ,等于流动曲线的斜率 , $n$  为流

体特性指数 ,表示与牛顿流体偏离的程度 , $K$  为稠度系数。

依据 3 种流变模型方程 ,利用最小二乘法对 2 种磨料浆体的流变曲线分别进行拟合 ,得到 3 种模型拟合曲线如图 6 和图 7 所示 ,各模型的有关参数和相关系数如表 7 和表 8 所示。

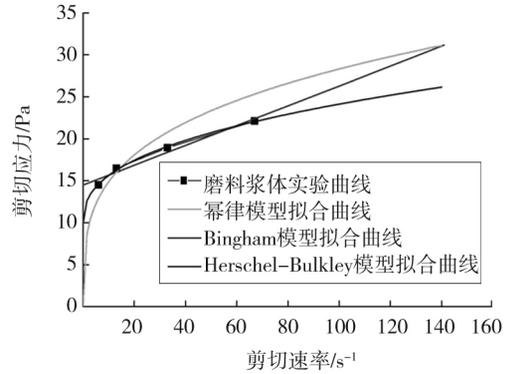


图 6 石榴石磨料浆体 3 种模型拟合曲线  
Fig. 6 Three model fitting curves of garnet abrasive suspension

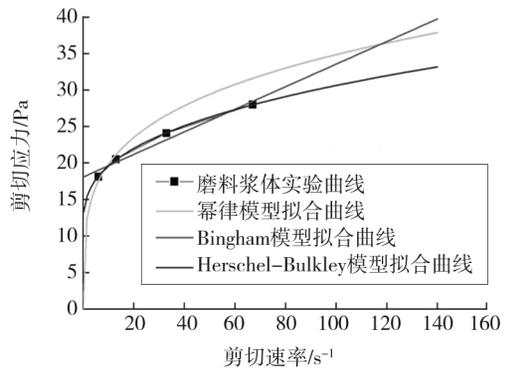


图 7 钢砂磨料浆体 3 种模型的拟合曲线  
Fig. 7 Three model fitting curves of steel grit abrasive suspension

表 7 石榴石磨料浆体 3 种模型拟合结果

Tab. 7 Fitting results of garnet abrasive suspension

模型名称	方程形式	有关参数	相关系数
幂律模型	$\tau = K\dot{\gamma}^n$	$K=7.839 \ 3$	0.938 \ 68
		$n=0.278 \ 86$	
Bingham 模型	$\tau = \tau_y + \eta_p \dot{\gamma}$	$\tau_y=16.668 \ 04$	0.951 \ 23
		$\eta_p=0.210 \ 55$	
Herschel-Bulkley 模型	$\tau = \tau_y + K\dot{\gamma}^n$	$\tau_y=9.970 \ 76$	0.992 \ 02
		$K=2.268 \ 9$ $n=0.397 \ 57$	

表 8 钢砂磨料浆体 3 种模型拟合结果

Tab. 8 Fitting results of steel grit abrasive suspension

模型名称	方程形式	有关参数	相关系数
幂律模型	$\tau = K\dot{\gamma}^n$	$K=11.273\ 98$	0.936 67
		$n=0.245\ 12$	
Bingham 模型	$\tau = \tau_y + \eta_p \dot{\gamma}$	$\tau_y=18.079\ 48$	0.947 63
		$\eta_p=0.154\ 71$	
		$\tau_y=11.336\ 6$	
Herschel-Bulkley 模型	$\tau = \tau_y + K\dot{\gamma}^n$	$K=3.531\ 21$	0.999 2
		$n=0.368\ 66$	

从表 7 和表 8 可以看出,采用 Herschel-Bulkley 模型描述石榴石磨料浆体和钢砂磨料浆体的流变特性时,拟合方程的相关系数最大,由图 6 和图 7 也可以看出 2 种磨料浆体的流变曲线与 Herschel-Bulkley 模型的拟合曲线走向最为接近,因此,选用 Herschel-Bulkley 模型来表征石榴石磨料浆体和钢砂磨料浆体的流变特性的本构方程。

以石榴石为磨料的浆体本构方程为

$$\tau = 9.970\ 76 + 2.2689\dot{\gamma}^{0.39757}, \quad (4)$$

以钢砂为磨料的浆体本构方程为

$$\tau = 11.3366 + 3.5312\dot{\gamma}^{0.36866}。 \quad (5)$$

## 5 结论

1) 配制了 4 种浓度的 PAM 溶液进行黏度测定实验,发现其表观黏度随着剪切速率的增大而减小,此外,其表观黏度也会随着溶液的质量浓度的增大而增大,当质量浓度  $\rho_{\text{PAM}}=9\ \text{g/L}$  时,PAM 溶液的表观黏度会明显增大。

2) 使用质量浓度  $\rho_{\text{PAM}}=6\ \text{g/L}$  的 PAM 溶液作为添加剂,分别采用石榴石和钢砂作为磨料配制磨料浆体。结果发现:磨料粒径和磨料质量浓度对磨料浆体的黏度的影响较小,浆体黏度没有产生明显变化。另外,对于不同种磨料,石榴石磨料浆体和钢砂磨料浆体的黏度曲线变化规律大致相同,均符合非牛顿流体的流变特征,浆体黏度随着剪切速率增大而减小。

3) 通过设计正交试验,采用直观分析和方差分析方法,综合分析了 PAM 质量浓度、磨料质量浓度、磨料粒径 3 种因素分别对石榴石磨料浆体黏度和钢砂磨料浆体黏度的影响程度。结果表明:对于石榴石磨

料浆体,PAM 质量浓度对磨料浆体黏度的影响最为显著,磨料质量浓度次之,磨料粒径对磨料浆体黏度无明显影响。对于钢砂磨料浆体,PAM 质量浓度对磨料浆体黏度有显著影响,磨料质量浓度和磨料粒径对磨料浆体黏度无明显影响。

4) 利用幂律模型、Bingham 模型及 Herschel-Bulkley 模型对实验测得的流变参数进行拟合,通过比较分析,优选出 Herschel-Bulkley 模型作为描述 2 种磨料的磨料浆体流变特性的最佳模型,建立了石榴石磨料浆体和钢砂磨料浆体的本构方程,得到了磨料浆体的流变特性规律。

## 参考文献(References):

- [1] HOLLINGER R H, PERRY W D, SWANSON R K. Precision cutting with a low pressure, coherent abrasive suspension jet[C]//5th American Water Jet Conference, 1989, 24(5):245-252.
- [2] ANDRZEJ P. Abrasive suspension water jet cutting optimization using orthogonal array design[J]. Procedia Engineering, 2016 (8):149-151.
- [3] KIM J G, SONG J J, HAN S S, et al. Slotting of concrete and rock using an abrasive suspension waterjet system[J]. Ksce Journal of Civil Engineering, 2012, 16(4):571-578.
- [4] 刘小健.磨料浆体射流技术及其机理研究[D].上海:上海大学,2006.
- [5] 廖兴斌.磨料浆体射流系统特性的研究[J].流体机械,1996,24(10):27-30.
- [6] 杨佩旋.微磨料浆体射流加工工艺研究[D].广东:广东工业大学,2008.
- [7] 杨菊萍.水解聚丙烯酰胺盐水溶液半经验流变方程[J].化工学报,2002,53(10):1089-1091.
- [8] 孔祥平,王娟,武侠.聚丙烯酰胺水溶液的流变特性[J].应用化工,2012,41(5):791-793.
- [9] KARTAL F. A review of the current state of abrasive water-jet turning machining method[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 88(4):495-505.
- [10] 林凌,罗平亚.分子结构对水解 AM/DMDAAC 聚合物流变性能影响[J].精细化工,2017,34(6):708-715.
- [11] 王成勇,王荣娟,杨佩旋,等.微磨料浆体射流的浆体配制及钻井性能研究[J].中国机械工程,2015,26(16):2191-2197.
- [12] 张成光,张勇,张飞虎,等.新型后混合式磨料水射流系统的研制[J].机械工程学报,2015,51(5):205-212
- [13] 祝连庆.生物流变特性测试方法及应用研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013.
- [14] GUAN Q Q, CHEN J, WEI Z C et al. Analyzing the spatial heterogeneity of number of plant individuals in grassland community by using power law model [J]. Ecological Modelling, 2016, 6(3), 320.
- [15] GüNEYİSİ E, GESOGLU M, NAJI N, et al. Evaluation of the rheological behavior of fresh self-compacting rubberized concrete by using the Herschel-Bulkley and modified Bingham models[J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2016, 16(1) 34.