



超声波对充填料浆流变特性的影响及流变参数预测

王志凯^{1,3}, 吕文生¹, 杨鹏^{1,2}, 王志军¹, 诸利一¹

- (1. 北京科技大学 土木与资源工程学院, 北京 100083;
2. 北京联合大学 北京市信息服务工程重点试验室, 北京 100101;
3. 中国恩菲工程技术有限公司 恩菲研究院, 北京 100038)

摘要: 为了改善高浓度充填料浆的流变特性, 降低充填系统中堵管现象发生的概率, 将超声波非接触性地作用于充填料浆。采用高精度 Brookfield R/S-SST 软固体测试仪, 通过试验检测得到超声波作用下不同浓度、不同灰砂比全尾砂充填料浆的流变参数。结果表明: 超声波可以显著改善充填料浆的流变特性, 降低充填料浆的塑性黏度和屈服应力, 超声对料浆黏度值的降低效果可达 4.32%~39.33%, 对料浆屈服应力的减小效果可达 9.66%~34.27%。同时, 借助支持向量机建立充填料浆流变参数预测模型。所得预测模型校验结果显示, 该模型精度较高, 具有较强的泛化能力, 实现了功率超声条件下充填料浆流变参数的预测。

关键词 超声波; 充填料浆; 流变参数; 支持向量机

文章编号: 1004-0609(2018)-07-1442-11

中图分类号: TD853

文献标志码: A

为了满足经济持续发展的需要, 矿产资源的开发规模越来越大。随着浅地表资源的消耗殆尽以及社会发展对矿产资源需求的日益增长, 深井开采将是未来矿业的发展方向^[1-2]。由于深部开采高应力、高地压、高地温的特点, 再加上建设绿色矿山和矿业可持续发展趋势, 使充填采矿法成为深部开采的首选方法。在充填采矿中, 又以高浓度尾砂充填法应用的最多^[3]。改善料浆在充填管道输送过程中的流动性, 是实现矿山高效充填, 提高充填质量的重要保证。充填料浆的流变特性是整个输送环节的核心, 直接关系到充填管路阻力的计算, 影响管道参数的设计, 同时料浆黏度及屈服应力的减小将有助于降低管道堵管现象发生的概率^[4]。目前, 测量流变参数的方法有直接法和间接法两种^[5]。LIDDELL 等^[6]研究表明: 同轴圆柱检测法得到的屈服应力明显小于浆式转子检测法的结果; SAAK 等^[7]的研究表明, 同一台流变仪, 不同的转速下应力结果也不同, 转子转速越快, 检测屈服应力越大。SAAK 等^[8]在对新拌砂浆流变特性的测试中发现, 浆式流变仪能够有效降低壁面滑移效应的影响。吴爱祥等^[9]分别利用塌落度法和浆式流变仪对膏体的屈服应力进行了测试, 塌落度法所得结果为膏体动态屈服

应力, 浆式流变仪的操作方法不同其屈服应力检测结果相差较大, 采用控制剪切应力法所得为静态屈服应力, 控制剪切速率法所得为动态屈服应力。刘同有^[10]对比了几种典型流变仪的测试效果, 提出应根据物料的性质和粒度组成选择流变特性的检测方法, 细物料可选用旋转黏度计, 掺入粗骨料时可选用两点仪, 对于复杂物料应通过环管输送试验来测定。黄玉诚等^[11-12]采用 NXS-11A 型旋转式黏度计对尾砂作骨料的似膏体充填料浆进行了系列试验, 得到了相应的流变关系曲线, 充填料浆适用于宾汉塑性体进行回归。

超声技术是一门以物理、电子、机械以及材料为基础的高新技术之一。随着科学技术的发展, 相关技术领域相互渗透, 超声技术在工业、化工、医学、石油化工等行业得到了广泛应用^[13]。DU 等^[14]提出浓密机结合超声波处理, 通过冷冻制样扫描电镜 (Cryo-SEM), 从微观结构上分析了超声波处理砂浆, 颗粒絮体结构的改变。LI 等^[15]提出利用超声波处理可以改变水煤浆的流变特性, 降低水煤浆的表观黏度值。GUO 等^[16]提出了不同超声处理时间对水煤浆黏度的影响原因, CHU 等^[17]利用超声波处理污泥, 发现多孔

絮凝物容易重组为更紧凑的结构, 王志凯等^[18]研究发现超声波能快速促进尾砂浆浓密沉降, 同时改善砂浆的流变特性, 从而避免了添加絮凝剂致使砂仓壁细砂板结和延长浓密时间带来的弊端。

充填料浆的流变特性涉及到众多不确定性因素, 各因素之间往往表现出非线性关系, 传统的数学模型很难表达和揭示其内在联系。超声波对浆体的作用机理尚停留在宏观认识, 目前还没有具体的数学公式和模型可以对此进行计算。因此, 有必要对超声与充填料浆流变特性的响应关系建立一个预测模型, 来指导充填料浆的配比和制备, 以满足工程需要。

1 实验

1.1 试验材料

充填材料来源于充填站现场采集的全尾砂和水泥。在实验室进行表观相对密度和容重试验可得水泥和尾砂的物理参数如表 1 和 2 所列。

表 1 全尾砂物理参数

Table 1 Physical parameters of tailings

Density/(g·cm ⁻³)	Bulk density/(g·cm ⁻³)	Porosity/%
2.62	1.635	37.60

表 2 水泥物理参数

Table 2 Physical parameters of cement

Density/(g·cm ⁻³)	Bulk density/(g·cm ⁻³)	Relative density	Specific area/(m ² ·cm ⁻³)
2.89	1.12	2.9	1.689

对尾砂和水泥的粒度组成采用 LMS-30 激光粒度分布测定仪进行检测。尾砂和水泥的粒度分布情况如图 1 和 2 所示。

全尾砂的不均匀系数 $C_u=3.149$, 尾砂中颗粒粒径的分布较为分散, 大颗粒与小颗粒之间的粒径相差较大。

1.2 试验装置

超声波发生器的频率范围为 20~45 kHz, 功率的变化范围为 0~900 W, 可以通过安装不同数目的换能器(振子)来实现最大功率的转换。本次试验最终所选用的超声波发生器如图 3(a)所示。超声波换能器单个振子功率范围为 0~100 W, 如图 3(b)所示。

本试验流变参数测量装置采用美国 Brookfield 公

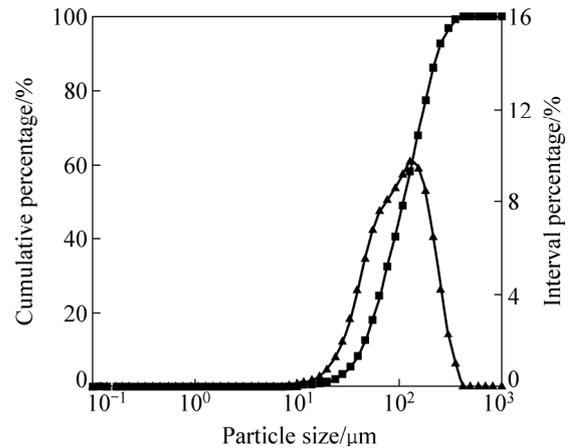


图 1 尾砂粒度分布曲线图

Fig. 1 Size distribution of tailings

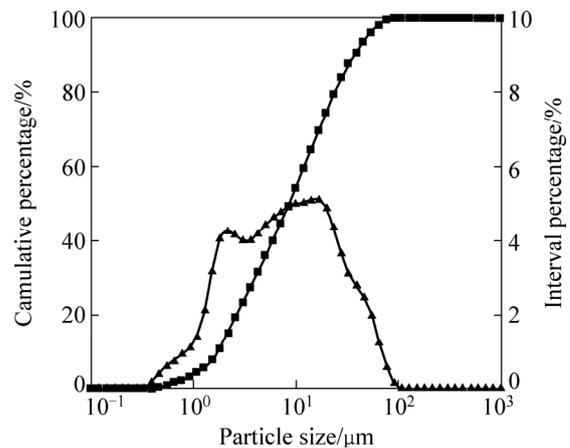


图 2 水泥粒度分布曲线图

Fig. 2 Size distribution of cement

司生产的 R/S-SST 软固体测试仪, 料浆测试容器使用防锈防磁的不锈钢材料, 容器的外形尺寸如图 4(a)所示, 实物图如 4(b)所示。

流变仪、测试容器、超声波发生器, 振子和电脑组成了整个测量系统。超声波发生器通过换能器作用于测量容器内的充填料浆, 流变仪将桨式转子转动测量的流变参数数据传输给 Rheo2000 软件, Rheo2000 软件对数据进行分析拟合并得出流变参数测量结果。

1.3 试验步骤

全尾砂充填料浆浓度配比分别为 70%、72%、74%、76%和 78%, 灰砂比为 1:6、1:8 和 1:10。为了降低试验误差, 每种组别的料浆进行至少 3 次试验, 然后剔除异常数据取平均值。超声波的频率为 20 kHz 和 40 kHz 两种, 功率分别为 0(不施加超声波)、25、50、75 和 100 W。考察超声波功率参数对充填料浆流

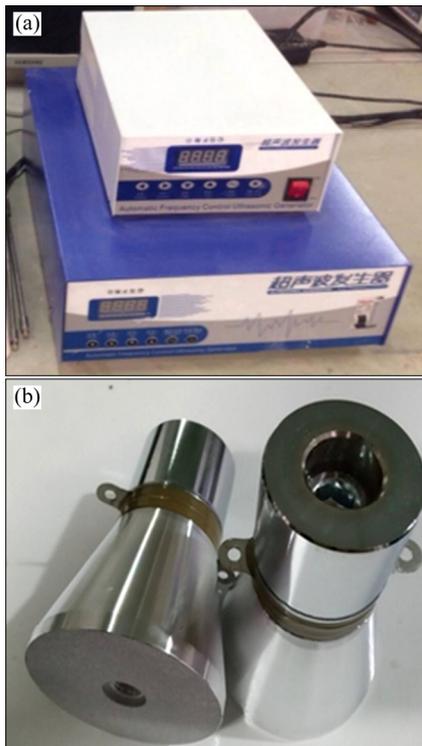


图3 超声波发生器与超声波振子

Fig. 3 Ultrasonic generator (a) and transducer (b)

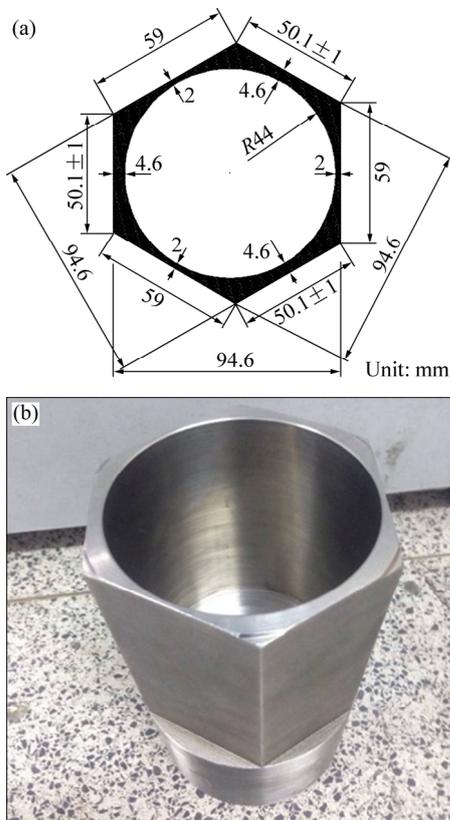


图4 黏度与屈服应力测试容器

Fig. 4 Test container for viscosity and yield stress:
(a) Schematic diagram; (b) Photo

变参数黏度值 η 和屈服应力 τ_0 的影响, 本次流变试验的充填料浆采用 Bingham 模型。

首先将配好的全尾砂料浆手动搅拌 5 min。把钢筒固定到合适的位置, 料浆倒入到钢筒中搅拌均匀后安装 V-3-60-30 浆式转子, 操作 Rheo2000 软件开始进行试验, 测定不同浓度、不同配比的充填料浆在各个超声频率和功率、各剪切速率下的剪切应力值。预先将 Brookfield R/S-SST 软固体测试仪的 Rheo2000 软件将剪切时间设置为 120 s, 剪切速率范围 0~120 s^{-1} , 测试起始温度为室温(28 $^{\circ}C$)。

2 试验结果及分析

2.1 超声波对料浆黏度值的影响

2.1.1 20 kHz 不同功率超声波对料浆黏度的影响

在 20 kHz 超声频率下, 不同超声功率对不同浓度、不同灰砂比的充填料浆黏度值的影响如下图 5 所示。

从图 5 中可以看出, 在 20 kHz 的超声环境下, 当灰砂比为 1:6 时, 随着超声功率的增加, 料浆的黏度值总体上呈缓慢的下降趋势。料浆的黏度值在 50~75 W 功率范围内下降趋势相对较大, 在 0~25 W 功率范围内下降趋势不明显, 在 75~100 W 功率范围内下降趋势微弱。当充填料浆浓度为 72%、74%和 76%时, 施加 50 W 功率的超声波, 充填料浆黏度值已经表现出明显的下降趋势。当灰砂比为 1:8 时, 随着超声功率的增加, 料浆的黏度值呈线性下降趋势, 超声波对灰砂比 1:8 的料浆降黏效果整体较好。当料浆灰砂比为 1:10 时, 25~75 W 的功率对料浆黏度值降低最为有效, 并且在此功率范围内, 黏度值的降低最为明显, 功率大于 75 W 后, 黏度值的下降趋势变缓慢, 但总体上随着超声波功率的增大, 黏度值趋于下降。经计算, 20 kHz 功率为 25 W 的超声波使不同灰砂比、不同浓度的充填料浆的塑性黏度平均减小了 0.022 Pa·s, 降低了 4.32%; 超声波功率为 50 W 时, 塑性黏度平均减小 0.062 Pa·s, 降低 12.01%; 超声波功率为 75 W 时, 塑性黏度平均减小了 0.122 Pa·s, 降低 23.98%; 超声波功率为 100 W 时, 塑性黏度平均减小了 0.138 Pa·s, 降低 25.26%, 降黏效果最优。

2.1.2 40 kHz 不同功率超声对料浆黏度的影响

在 40 kHz 超声频率下, 不同功率超声波对不同浓度、不同灰砂比的充填料浆黏度值的影响如下图 6 所示。

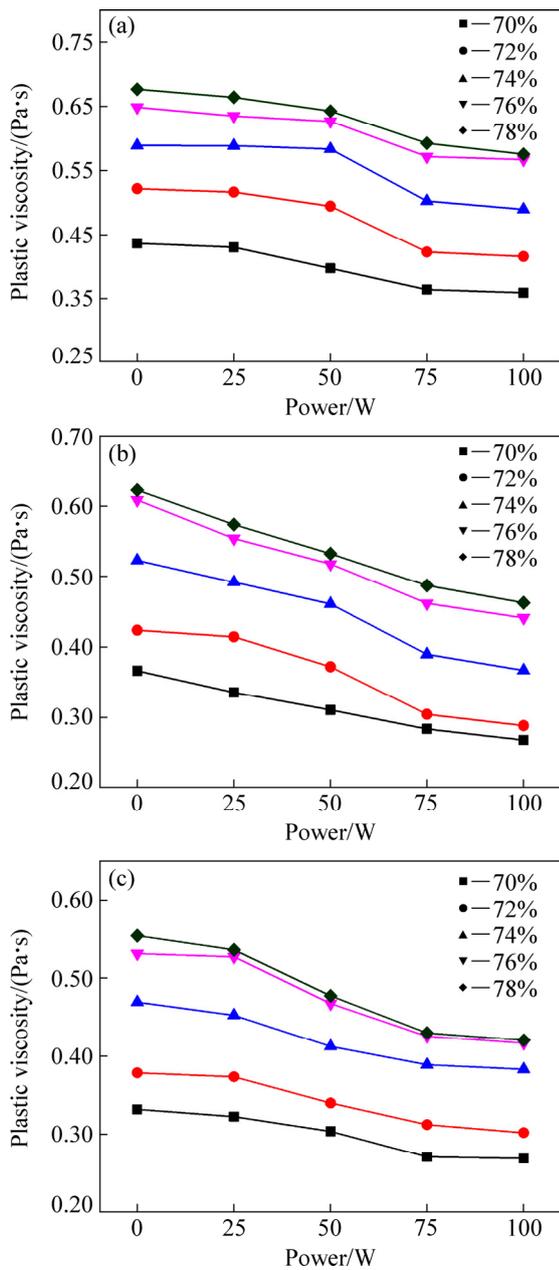


图 5 黏度随功率(20 kHz)的变化曲线

Fig. 5 Curves of viscosity versus power (20 kHz) with different cement-sand ratios: (a) 1:6; (b) 1:8; (c) 1:10

由图 6 可以看出, 在 40 kHz 超声波作用下, 灰砂比为 1:6 时, 随着超声功率的增加, 料浆的黏度值总体上呈缓慢的下降趋势。超声波对浓度为 78% 的充填料浆降黏效果超过了浓度为 76% 的充填料浆。超声功率为 0~25 W 时, 降黏程度最高。当灰砂比为 1:8 时, 超声波对浓度分别为 72% 和 74% 的充填料浆降黏效果最优。当料浆灰砂比为 1:10 时, 浓度为 70% 的充填料浆的降黏程度最小, 超声波对浓度为 74% 的充填料浆降黏效果最佳。其中, 功率为 100 W 时, 黏度平均减

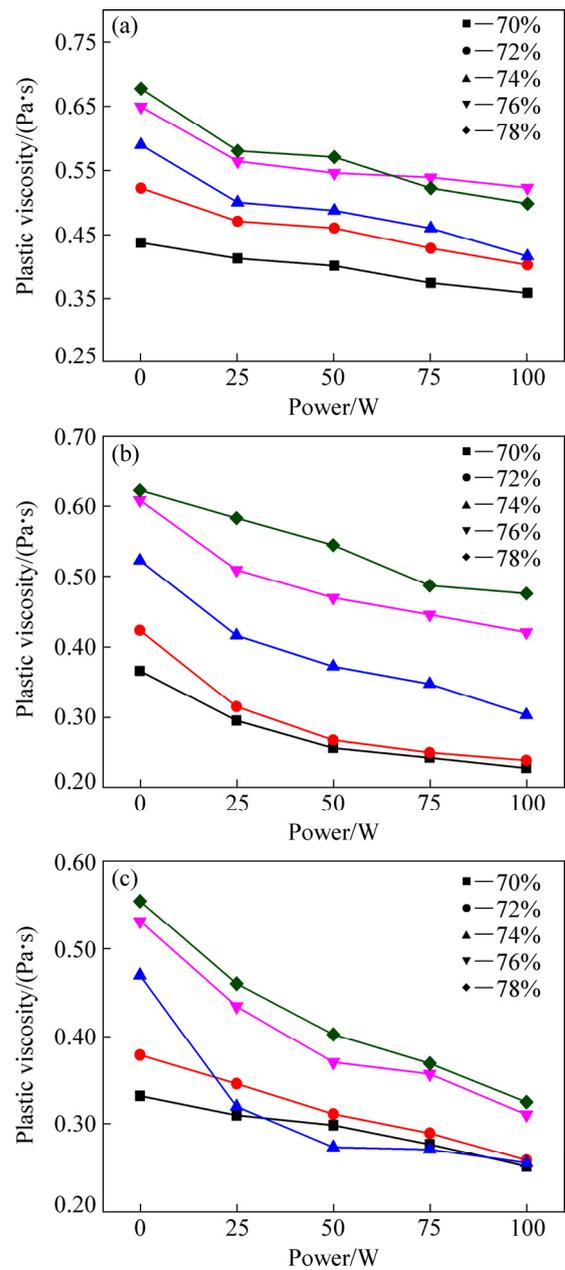


图 6 黏度随功率(40 kHz)的变化曲线

Fig. 6 Curves of viscosity versus power (40 kHz) with different cement-sand ratios: (a) 1:6; (b) 1:8; (c) 1:10

小了 0.201 Pa·s, 降低 39.33%。充填料浆的黏度值随着超声功率的增加而减小, 不同超声功率的降黏效果也随着料浆灰砂比和浓度的不同而变化。与频率为 20 kHz 的超声波作用相比较, 40 kHz 的超声波降黏效果更优。

2.2 超声波对料浆屈服应力的影响

2.2.1 20 kHz 不同功率超声对料浆屈服应力的影响

在 20 kHz 超声频率下, 超声功率因素对充填料浆屈服应力的影响如下图 7 所示。

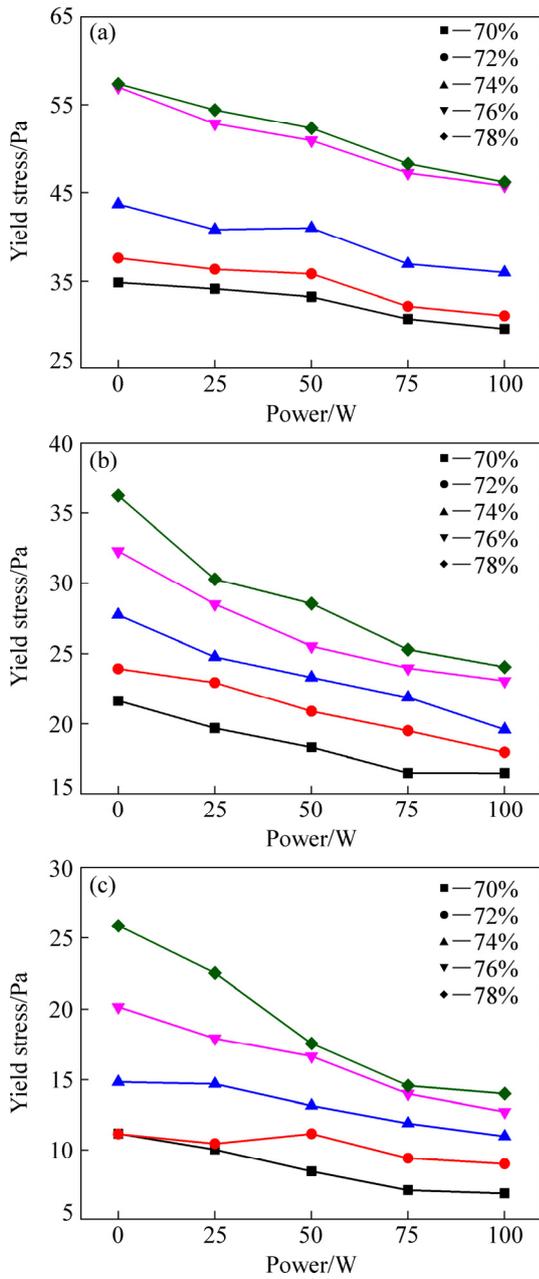


图 7 屈服应力随功率(20 kHz)的变化曲线
Fig. 7 Curves of yield stress versus power (20 kHz) with different cement-sand ratios: (a) 1:6; (b) 1:8; (c) 1:10

从图 7 中可以看出, 充填料浆屈服应力也是随着超声功率的增加而减小。超声的作用效果随着灰砂比和浓度的增加而增强, 随着其功率的增大而增强。其中超声功率在 100 W 屈服应力平均降低了 30.77%。

2.2.2 40 kHz 不同功率超声对料浆屈服应力的影响

在 40 kHz 超声频率下, 超声功率因素对充填料浆屈服应力的影响如下图 8 所示。

从图 8 中可以看出, 频率为 40 kHz 功率超声对料浆屈服应力的减小作用呈缓慢下降趋势, 料浆屈服应

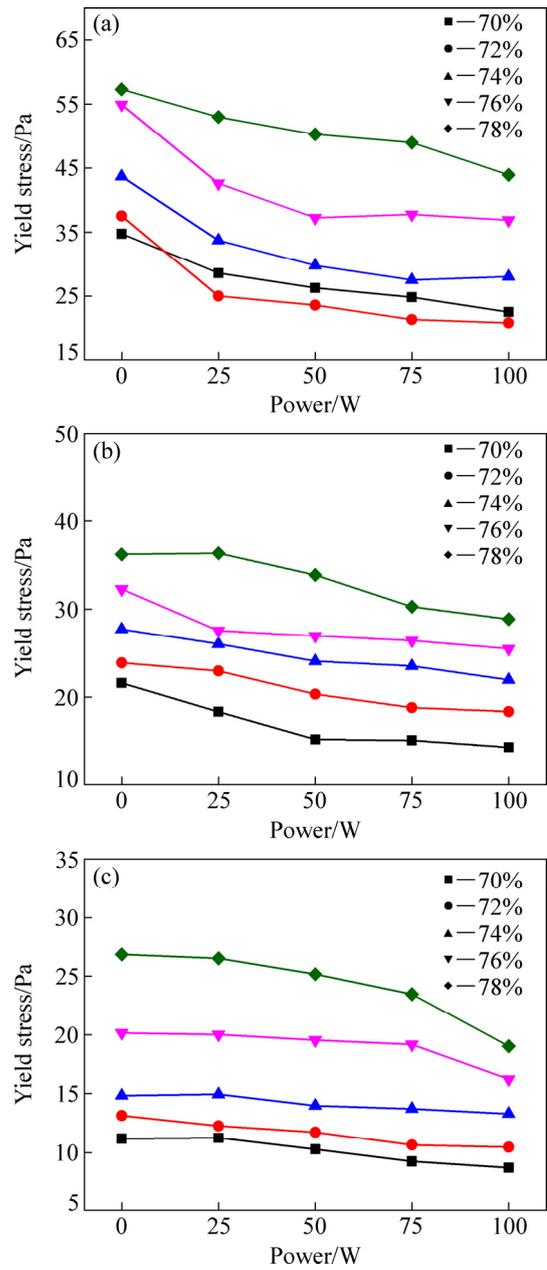


图 8 屈服应力随功率(40 kHz)的变化曲线
Fig. 8 Curves of yield stress versus power (40 kHz) with different cement-sand ratios: (a) 1:6; (b) 1:8; (c) 1:10

力随着超声功率的增加而减小。100 W 时, 屈服应力平均减小了 10.424 Pa, 降低 34.27%。与 20 kHz 超声波作用相比较, 40 kHz 超声波作用对高浓度充填料浆屈服应力的减小更有效果。

2.3 超声波作用对充填料浆降黏机理分析

超声波作用于尾砂充填料浆时, 在分子链之间薄弱处或充填料浆与容器壁面接触处产生超声空化效应。超声空化效应可以形成了微泡, 并且在尾砂颗粒

表面上富集, 伴随着空化气泡的崩溃带来的热点、射流、冲击波等效应会对充填料浆在宏观和微观上产生一定的影响, 如图 9 所示。

宏观上, 超声波作用相当于在稳态剪切流动的充填料浆上施加了一个脉冲推动力, 促使了充填料浆在整体沿流动方向运动。微观上, 超声波在充填料浆中传播时, 由于耗散作用超声波在较大的范围内作用于充填料浆, 充填料浆吸收超声波能量, 加剧了分子在平衡位置的振动, 增加了分子链的能量, 同时增强了分子链的活动性, 从而减弱了分子链之间相互作用, 降低了对流动产生的黏性阻力, 单个分子链的运动自由度和运动能量增加, 使超声作用下充填料浆分子链的构象发生了改变。同时, 超声波的空化作用引起的热效应会在瞬间产生高温高压, 虽然作用范围较小, 但仍然对周围分子链产生了热降解。微射流和冲击波会剪断部分分子链, 使充填料浆的分子量降低, 分子结构发生变化, 表现为充填料浆黏度的降低。

3 基于 SVM 的料浆流变参数预测

3.1 模型的建立

基于支持向量机(SVM)方法建立功率超声条件下浆体流变参数预测模型。按照获取样本、选择条件属性、数据归一化处理、训练挖掘 4 个步骤建立模型。

3.1.1 模型影响因素的选择

充填料浆流变特性的影响因素多而且影响特性复杂, 各因素之间表现出非线性特征。影响充填料浆流变参数的自身因素主要有浆体浓度、灰砂比、尾砂物理化学性质、粒级组成与级配、胶凝材料种类、细颗粒含量、温度等, 超声对浆体流变特性影响的因素主要为功率和频率。在研究多因素影响规律时, 选择可主动控制和调节的因素作为试验因素。因此, 确定浓

度、灰砂比、功率、频率、屈服应力、黏度值为试验因素。

在支持向量机回归预测模型中, 试验样本中的试验因素分为条件属性和决策属性。最终, 确定条件属性为浓度、灰砂比、功率、频率, 决策属性为屈服应力、黏度值。

3.1.2 样本数据预处理

选取训练样本集是建立支持向量机回归预测模型首要问题^[19]。通过充填料浆的流变试验所得试验数据作为预测模型的样本数据。试验数据经过筛选共得到 120 组, 其中 110 组作为训练样本用于模型的训练学习, 如表 3 所列, 10 组作为校验样本用来检验训练好的预测模型, 如表 4 所列。

为了消除条件属性中不同量纲的数据对结果的影响, 加快训练网络的收敛性, 使数据具有可比性的特点以及统计意义, 需要对原始输入变量值进行归一化处理。

采用最大最小归一化方法对样本数据进行归一化处理, 如式 1 所示的。条件属性和决策属性的归一化区间为[0, 1]。

$$\hat{x}_i = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (1)$$

式中: \hat{x}_i 为归一化后的属性值; x_i 为归一化前的属性值; x_{\min} 为样本集合中对应属性的最小值; x_{\max} 为样本集合中对应属性的最大值。

归一化处理后的样本数据如表 5 所列。

3.1.3 模型及参数

在 SVM 中, 映射函数、核函数、特征空间, 三者一一对应。因此, 在构造 SVM 模型时, 必须合理选取核函数和惩罚参数。

选用径向基核函数(RBF)作为回归预测模型的核函数。最终支持向量机拟合函数的表达式可以写为

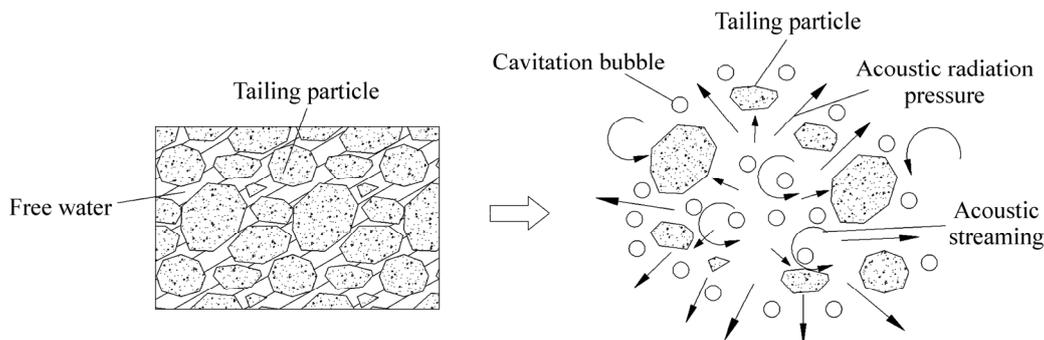


图 9 超声波对尾砂浆颗粒的作用

Fig. 9 Effect of ultrasonic waves on unclassified tailing particles: (a) Before ultrasonic treatment; (b) After ultrasonic treatment

表3 部分训练样本数据

Table 3 Partial training sample data

Order	Cement-sand ratio/%	Concentration/%	Frequency/kHz	Power/W	Viscosity/(Pa·s)	Yield stress/Pa
1	0.167	70	20	0	0.4366	34.7821
2	0.167	70	20	25	0.4303	34.0821
3	0.167	72	40	0	0.494	26.7184
4	0.167	74	20	50	0.5833	41.0207
5	0.167	74	40	25	0.4994	29.7687
6	0.167	76	20	100	0.5668	45.8069
7	0.167	76	40	50	0.5452	37.2951
8	0.167	78	40	100	0.5078	48.9753
9	0.125	72	20	25	0.4141	22.9119
10	0.125	74	20	50	0.4606	22.2863
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
105	0.1	74	20	50	0.4125	13.1406
106	0.1	74	20	100	0.3933	10.969
107	0.1	74	40	25	0.3196	14.9542
108	0.1	76	20	100	0.4169	12.7032
109	0.1	76	40	72	0.3568	19.1812
110	0.1	78	40	100	0.4235	23.0324

表4 校验样本数据

Table 4 Check sample data

Order	Cement-sand ratio/%	Concentration/%	Frequency/kHz	Power/W	Viscosity/(Pa·s)	Yield stress/Pa
1	0.167	70	20	50	0.4274	33.1786
2	0.167	72	40	25	0.4903	25.0677
3	0.167	74	20	75	0.5026	36.9011
4	0.125	72	40	100	0.2396	18.3871
5	0.125	74	20	25	0.4913	24.7428
6	0.125	76	40	100	0.4181	25.4903
7	0.125	78	40	50	0.5444	35.8701
8	0.1	74	20	75	0.3989	11.8747
9	0.1	76	40	25	0.4339	22.0188
10	0.1	78	40	50	0.4997	25.1729

$$f(x) = \sum_{i=1}^k (\alpha_i - \alpha_i^*) \exp\left(-\frac{x_i - x_j^2}{\sigma^2}\right) + b \quad (2)$$

惩罚因子和核函数的参数是影响支持向量机性能的主要参数。在支持向量机优化过程中,惩罚系数 C 和核函数参数 g 的选择对实现结构风险最小化、选取支持向量集、建立决策函数至关重要,参数值的不同所构造的决策函数也不同。

采用网格搜索法参数寻优的方法对惩罚参数 C 、核函数参数 g 进行寻优,再通过 Cross validation(交叉

验证,简称 CV)对比试验进行测试,最终得到最优的参数组合。利用网格搜索算法优化支持向量机参数时,支持向量机的惩罚参数 C 和高斯函数 g 的取值范围分别为 $2^{-10} \leq C \leq 2^{10}$, $2^{-10} \leq g \leq 2^{10}$ 。

3.2 模型的实现与结果校验

得到模型粗略的选择结果如图 10 所示,精细的选择结果如图 11 所示。

经过对模型参数的粗略选择和精细选择,最终确

表 5 归一化后的校验样本数据

Table 5 Normalized calibration sample data

Order	Cement-sand ratio/%	Concentration/%	Frequency/kHz	Power/W	Viscosity/(Pa·s)	Yield stress/Pa
1	1	0	0	0	0.5752	0.5863
2	1	0	0	0.25	0.5624	0.5716
3	1	0.25	1	0	0.6919	0.4167
4	1	0.5	0	0.50	0.8735	0.7175
5	1	0.5	1	0.25	0.7029	0.4809
6	1	0.75	0	1	0.8400	0.8182
7	1	0.75	1	0.50	0.7961	0.6392
8	1	1	1	1	0.7200	0.8848
9	0.3731	0.25	0	0.25	0.5295	0.3367
10	0.3731	0.5	0	0.50	0.6240	0.3235
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
105	0	0.5	0	0.50	0.5262	0.1312
106	0	0.5	0	1	0.4872	0.0855
107	0	0.5	1	0.25	0.3373	0.1693
108	0	0.75	0	1	0.5352	0.1220
109	0	0.75	1	0.75	0.4130	0.2582
110	0	1	1	1	0.5486	0.3392

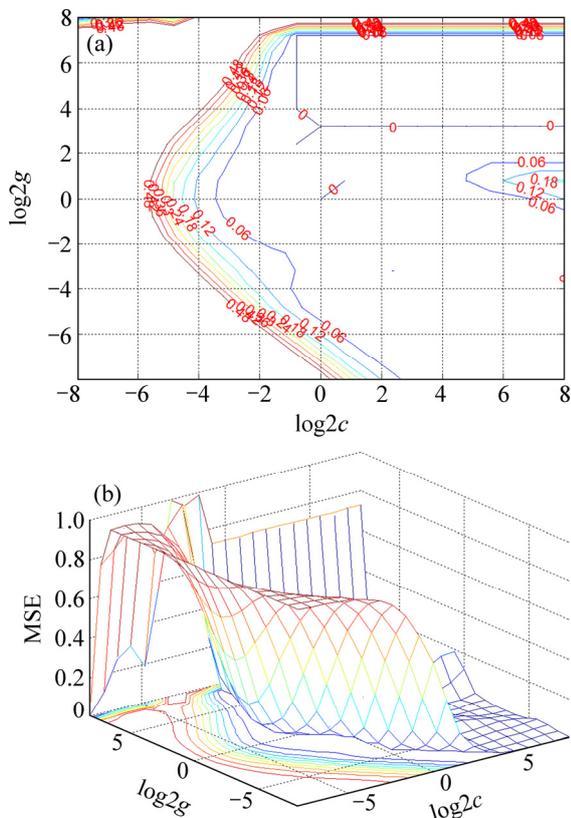


图 10 粗略选择的结果图

Fig. 10 Roughly selected results ($C=1.7411$, $g=1.7411$, $CV_{mse}=0.0028237$): (a) Contour map; (b) 3D map

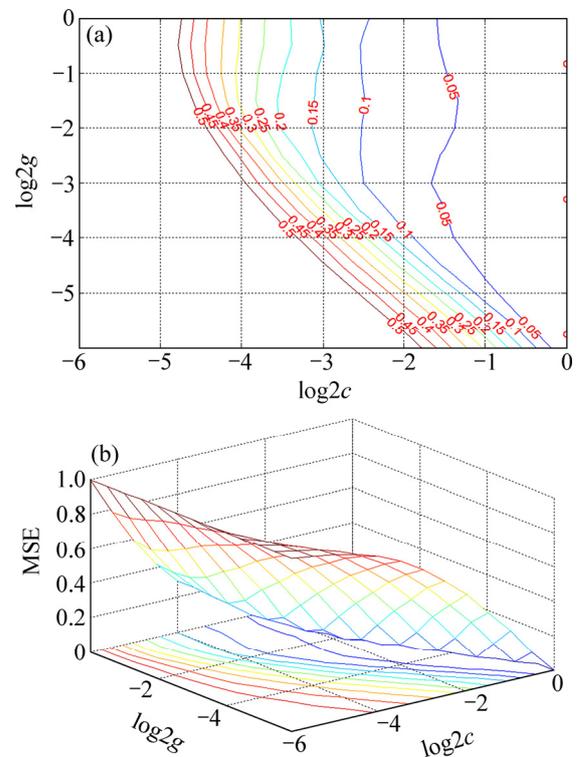


图 11 精细选择的结果图

Fig. 11 Fine selected results ($C=1$, $g=0.70711$, $CV_{mse}=0.002482$): (a) Contour map; (b) 3D map

定参数 $C=1$, $g=0.7071$ 。使用建立的模型对校验样本进行回归预测, 得到原始数据和回归数据对比图如图

12所示。对预测数据进行分析,可以得到SVM模型预测的平均误差为7.26%,最大误差为11.17%。对训练好的模型进行校验,使用未参与预测模型训练的10个试验数据进行预测,预测结果如图13所示。该模型预测结果的相对误差为7.89%,相对误差较小,精度较高,模型具有较强的泛化能力。

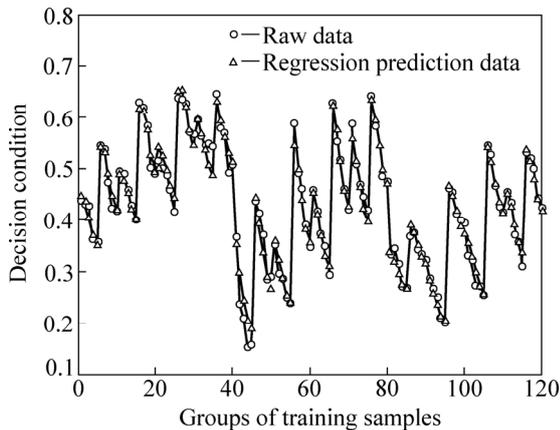


图12 原始数据和回归预测数据对比

Fig. 12 Comparison of raw data and regression prediction data

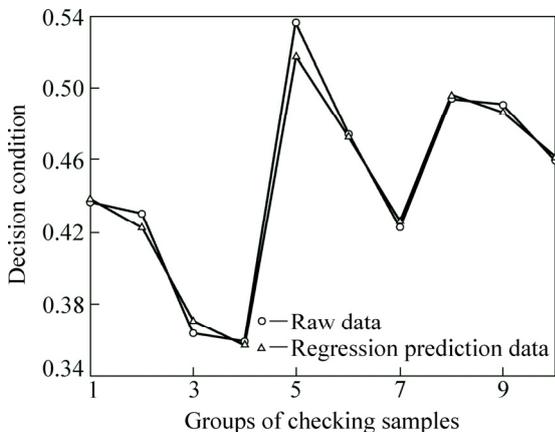


图13 模型预测验证结果图

Fig. 13 Model predictive verification results

4 结论

1) 超声波功率的变化对充填料浆的黏度值和屈服应力产生了不同程度的影响。在超声功率为0~100W范围内,超声对料浆黏度值的降低效果达到了4.32%~39.33%,对料浆屈服应力的减小效果达到了9.66%~34.27%,浆体的黏度值和屈服应力随着灰砂比和浓度的增大而增大,随着超声功率的增大而减小。

2) 超声波的功率因素对浆体流变特性的影响最为显著,并且存在超声对料浆流变特性作用效果较佳的功率范围,功率范围因料浆灰砂比和浓度等因素的不同而变化。与20 kHz超声波作用相比较,40 kHz超声波作用对充填料浆黏度和屈服应力的减小更有效。

3) 基于SVM算法建立充填料浆流变参数预测模型。模型选用径向基核函数,经过网格搜索法确定模型参数选取惩罚参数 $C=1$,径向基核函数参数 $g=0.7071$ 。所得预测模型校验结果的平均误差为7.26%,最大误差为11.17%。使用该模型进行预测所得结果的相对误差为7.89%,说明该模型预测精度较高,具有较强的泛化能力。

REFERENCES

- [1] 柯愈贤,王新民,张钦礼.全尾砂料浆磁化絮凝沉降特性[J].中国有色金属学报,2017,27(2):392-398.
KE Yu-xian, WANG Xin-min, ZHANG Qin-li. Flocculating sedimentation characteristic of pre-magnetized crude tailings slurry[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2017, 27(2): 392-398.
- [2] 焦华喆,王洪江,吴爱祥,吉学文,严庆文,李祥.全尾砂絮凝沉降规律及其机理[J].北京科技大学学报,2010,32(6):702-707.
JIAO Hua-zhe, WANG Hong-jiang, WU Ai-xiang, JI Xue-wen, YAN Qing-wen, LI Xiang. Rule and mechanism of flocculation sedimentation of unclassified tailings[J]. Journal of University of Science & Technology Beijing, 2010, 32(6): 702-707.
- [3] 张海波,宋卫东.评述国内外充填采矿技术发展现状[J].中国矿业,2009,18(12):59-62.
ZHANG Hai-bo, SONG Wei-dong. Discussion on the current state of backfill mining from the domestic and foreign development[J]. China Mining Magazine, 2009, 18(12): 59-62.
- [4] 李茂辉,高谦,南世卿.新型胶结材料全尾砂浆流变特性试验分析[J].矿业研究与开发,2013,33(2):15-17.
LI Mao-hui, GAO Qian, NAN Shi-qing. Study on the rheological characteristics of total tailings slurry with new cementing material[J]. Mining Research & Development, 2013, 33(2): 15-17.
- [5] 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 Xiao-hui. Study on rheological behavior and pipe flow resistance of paste backfill[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2015.
- [6] LIDDEL P V, BOGER D V. Yield stress measurements with the vane[J]. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 1996, 63(2): 235-261.

- [7] SAAK A W, JENNINGS H M, SHAH S P. The influence of wall slip on yield stress and viscoelastic measurements of cement paste[J]. *Cement and Concrete Research*, 2001, 31(2): 205–212.
- [8] BAUER W, NÖTZEL D, WENZEL V, NIRSCHL H. Influence of dry mixing and distribution of conductive additives in cathodes for lithium ion batteries[J]. *Journal of Power Sources*, 2015, 288(3): 359–367.
- [9] 吴爱祥, 焦华喆, 王洪江, 仪辉, 李海豹, 刘晓辉, 刘斯忠. 膏体尾矿屈服应力检测及其优化[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2013, 44(8): 3370–3376.
WU Ai-xiang, JIAO Hua-zhe, WANG Hong-jiang, YI Hui, LI Hai-bao, LIU Xiao-hui, LIU Si-zhong. Yield stress measurements and optimization of Paste tailings[J]. *Journal of Central South University of Technology (Science and Technology)*, 2013, 44(8): 3370–3376.
- [10] 刘同有. 金川全尾砂膏体物料流变特性的研究[J]. *中国矿业*, 2001, 10(1): 17–21.
LIU Tong-you. Rheologic characteristic of high density tailings slurry used for stowing in Jinchuan mine[J]. *China Mining Magazine*, 2001, 10(1): 17–21.
- [11] 黄玉诚, 李晓明, 耿向慧, 石吉升, 韩国伟. 似膏体充填料浆流型和流态的研究[J]. *中国矿业*, 2009, 18(4): 96–98.
HUANG Yu-cheng, LI Xiao-ming, GENG Xiang-hui, SHI Ji-sheng, HAN Guo-wei. Study on the rheological model and flow state of paste-like fill slurry[J]. *China Mining Magazine*, 2009, 18(4): 96–98.
- [12] 黄玉诚, 孙恒虎. 尾砂作骨料的似膏体料浆流变特性实验研究[J]. *金属矿山*, 2003, 324(6): 8–10.
HUANG Yu-cheng, SUN Heng-hu. Experimental study on the rheological characteristic of paste-like slurry with tailings as aggregate[J]. *Metal Mine*, 2003, 324(6): 8–10.
- [13] 席细平, 马重芳, 王伟. 超声波技术应用现状[J]. *山西化工*, 2007, 27(1): 25–29.
XI Xi-ping, MA Chong-fang, WANG Wei. Application situation of ultrasonic technology[J]. *Shanxi Chemical Industry*, 2007, 27(1): 25–29.
- [14] DU J H, MCLOUGHLIN R, SMART R S C. Improving thickener bed density by ultrasonic treatment[J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2014, 133: 91–96.
- [15] LI Y X, LI B Q. Study on the ultrasonic irradiation of coal water slurry[J]. *Fuel*, 2000, 79(4): 235–241.
- [16] GUO Z, FENG R, ZHENG Y, FU X. Improvement in properties of coal water slurry by combined use of new additive and ultrasonic irradiation[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2007, 14(5): 583–588.
- [17] CHU C P, CHANG B, LIAO G S, JEAN D S, LEE D J. Observations on changes in ultrasonically treated waste-activated sludge[J]. *Water Research*, 2001, 35(4): 1038–1046.
- [18] 王志凯, 杨鹏, 吕文生, 汤寒松, 宋世文, 王志军. 超声波作用下尾砂浆浓密沉降及放砂[J]. *工程科学学报*, 2017, 39(9): 1313–1320.
WANG Zhi-kai, YANG Peng, LÜ Wen-sheng, TANG Han-song, SONG Shi-wen, WANG Zhi-jun. Thickening sedimentation and sand discharge of tailings slurry under ultrasonic[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2017, 39(9): 1313–1320.
- [19] 王志军, 吕文生, 杨鹏, 王志凯, 王金海. 充填体强度的支持向量机设计匹配模型[J]. *金属矿山*, 2016, 485(11): 34–38.
WANG Zhi-jun, LÜ Weng-sheng, YANG Peng, WANG Zhi-kai, WANG Jin-hai. Matching model of backfill strength design on support vector machines[J]. *Metal Mine*, 2016, 485(11): 34–38.

Effect of ultrasonic waves on rheological properties of backfilling slurry and prediction of rheological parameters

WANG Zhi-kai^{1,3}, LÜ Wen-sheng¹, YANG Peng^{1,2}, WANG Zhi-jun¹, ZHU Li-yi¹

(1. School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

2. Beijing Key Laboratory of Information Service Engineering, Beijing Union University, Beijing 100101, China;

3. China Enfi Engineering Corp., Enfi Research Institute, Beijing 100038, China)

Abstract: In order to improve the rheological properties of the high-concentration backfill slurry and reduce the probability plugging phenomenon occurred of backfilling system, the innovative non-contact effect of ultrasound on the backfilling slurry was studied. Using high-precision brookfield R/S-SST soft solid tester, the rheological parameters with different concentrations and different lime-sand ratios were obtained under different ultrasonic powers of backfill slurry. The results show that ultrasonic waves can significantly improve the rheological properties and reduce the plastic viscosity and yield stress of the backfilling slurry. The viscosity of backfill slurry can be reduced by ultrasonic waves from 4.32% to 39.33%, and the yield stress can be reduced from 9.66% to 34.27%. At the same time, the prediction model of rheological parameters of backfilling slurry was established by using support vector machine. The results of the prediction model show that the model has high precision and strong generalization ability. The prediction of rheological parameters of backfilling slurry under ultrasonic is realized.

Key words: ultrasonic wave; backfill slurry; rheological parameters; support vector machine

Foundation item: Project(51641401) supported by the National Natural Science Foundation of China

Received date: 2017-06-05; **Accepted date:** 2018-02-26

Corresponding author: LÜ Wen-sheng; Tel: +86-10-62333864; E-mail: sunluw@sina.com

(编辑 何学锋)