

doi:10.3969/j.issn.2095-1744.2023.11.016

某金矿膏体料浆流变特性研究与神经网络分析

杨纪光^{1,2}, 王 辉¹, 王增加¹, 吴再海^{1,2}, 盛宇航^{1,3}, 荆晓东¹

(1. 山东黄金矿业科技有限公司, 山东 莱州 261441;

2. 北京科技大学 土木与资源工程学院, 北京 100083;

3. 山东省深海深地金属矿智能开采重点实验室, 济南 250101)

摘 要:通过研究某金矿的全尾砂基本性质,采用博乐飞 RSR-SST 型流变测试仪测定其膏体料浆的流变参数,获取流变曲线并分析其变化过程。利用 BP 神经网络原理,建立了以料浆质量浓度 X_1 、灰砂比 X_2 、容重 X_3 和扩展度 X_4 影响因素,屈服应力 Y_1 和塑性黏度 Y_2 两个流变参数的流变模型。结果表明:料浆质量浓度是影响流变特性的主要因素,料浆的扩展度次之,灰砂比和料浆容重影响最小;当质量浓度处于 72%~74% 时,灰砂比、料浆容重和扩展度对流变参数影响较小;全尾砂膏体流变参数随着料浆质量浓度、灰砂比呈线性增长;建立的流变函数模型在预测金矿充填料浆流变特性参数中的误差在可控范围、准确性高,可为管输沿程阻力计算、井下充填管网布置提供依据。

关键词:膏体料浆;流变特性;神经网络;预测分析

中图分类号:TD853.34

文献标志码:A

文章编号:2095-1744(2023)11-0117-09

Research on Rheological Characteristics of a Gold Mine Paste Slurry and Neural Network Analysis

YANG Jiguang^{1,2}, WANG Hui¹, WANG Zengjia¹, WU Zaihai^{1,2}, SHENG Yuhang¹, JING Xiaodong¹

(1. Shandong Gold Mining Co., Ltd., Laizhou 261441, China;

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

3. Shandong Key Laboratory of Deep-sea and Deep-earth Metallic Mineral Intelligent Mining, Jinan 250101, China)

Abstract: This article studies the basic properties of the tailings of a certain gold mine. The rheological parameters of the paste slurry were measured using the Bolefei RSR-SST rheological tester, to obtain the rheological curve and analyze its change process. Using the principle of BP neural network, A rheological model was established with slurry mass concentration X_1 , cement sand ratio X_2 , unit weight X_3 , and extensibility X_4 as influencing factors, and yield stress Y_1 and plastic viscosity Y_2 as two rheological parameters. The results show that the mass concentration of the slurry is the main factor affecting the rheological properties, the expansion of slurry takes the second place, and the ratio of cement to sand and the volume weight of slurry have the least influence. When the mass concentration is between 72% and 74%, the influence of ash sand ratio, slurry bulk density, and expansion degree on rheological parameters is relatively small. The rheological parameters of the full tailings paste increase linearly with the mass concentration of the slurry and the lime sand ratio. The established rheological function model has a controllable error and high accuracy in predicting the rheological characteristics parameters of the gold mine filling slurry, which can provide a basis for calculating the resistance along the pipeline transportation and arranging the underground filling pipeline network.

Key words: medium fine total tailings; vertical sand bin; static and dynamic flocculation; subsidence rule

收稿日期:2023-06-15

基金项目:“十三五”国家重点研发计划项目(2018YFC0604602);山东省重大科技创新工程项目(2019SDZY0504)

Fund: Supported by the National Key Research and Development Program of China (2018YFC0604602); Major Scientific and Technological Innovation Project of Shandong Province (2019SDZY0504)

作者简介:杨纪光(1986—),男,高级工程师,硕士研究生,从事矿山充填采矿工作。

引用格式:杨纪光,王辉,王增加,等. 某金矿膏体料浆流变特性研究与神经网络分析[J]. 有色金属工程,2023,13(11):117-125.

YANG Jiguang, WANG Hui, WANG Zengjia, et al. Research on Rheological Characteristics of a Gold Mine Paste Slurry and Neural Network Analysis[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2023, 13(11): 117-125.

充填采矿法是将选厂产生的固体废弃物尾砂回填到井下^[1],不仅提高矿产资源的回收和环境保护需要,还可较好的解决矿山井下采场地压问题^[2-3]。充填采矿法因其环保、安全、高效等优点在大部分金属矿山生产中得到广泛运用^[4-5]。其中充填料浆的管道输送是充填采矿法的一个重要环节,而影响和决定其输送的一个重要因素是料浆的流动特性^[6-7],目前主要采用 Brookfield RSR-SST 流变仪测定料浆的屈服应力和塑性黏度^[8-10]。对于管道输送固体颗粒形成的充填料浆,其流动性通常受多因素影响,在工矿领域的诸多应用方面,都涉及到充填料浆的管道输送技术^[11-16]。国内外部分学者也展开了一些研究,主要为通过建立塌落度结果与流变参数的关系来研究料浆的流变特性^[17-18],但是矿山现场往往缺乏相应的测试条件,适用性较差。而扩展度实验较为简单快速,是矿山生产中确定充填料浆流动性能的主要方法之一^[19-20]。利用软固体测试仪测定了料浆流变特性试验,计算了输送时的单位沿程阻力,现有宾汉体模型对尾砂料浆有很好的适用性,研究了低屈服应力、高屈服应力,总结出流变经验本构关系式^[26-27]。

自 20 世纪 80 年代反向神经网络提出后,神经网络以其独特的结构和信息处理方式,在充填料浆输送领域取得了显著的成效,用于正确建立充填料浆流变特性和其影响因素之间的模型,研究流变特性的影响因素^[28]。充分结合经验类比法和室内实验法^[29],刘志祥等^[30]展开分维数相关系数计算矿山实测数据,并采用 BP 神经网络进行训练和预测;李立涛等^[31]应用神经网络开展了新型充填胶凝材料配比优化正交试验;张修香等^[32]建立了屈服应力预测模型,进行废石-尾砂料浆流变特性研究;然而,目前对充填料浆流变参数的神经网络理论分析较少,主要因素分析不够,为掌握不同因素对充填料浆流动性能的作用,集合实验室实验来测定不同灰砂比、质量浓度、扩展度和容重的料浆流变参数,利用神经网络原理建立不同因素与充填料浆流变参数之间的映射关系模型,从不同角度分析其流变性能,为井下充填料浆输配管网提供设计依据。

某金矿位于山东省莱州市,主要是海底深部开采的黄金矿山,主要可采矿体均赋存于海底基岩中,机械化程度高,是我国第一座大陆架滨海矿床地下开采的硬岩矿山^[33]。以该矿全尾砂膏体料浆为研究对象,针对远距离管道输送存在的实际问题,开展了流变特性影响因素实验,并进行了神经网络预测分析。

1 实验材料及测试方法

1.1 实验材料与仪器

全尾砂膏体料浆所用尾砂来自某金矿浮选尾矿,实验前测定含水率。按照《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)要求进行尾砂真密度测定,测得其真密度 2.68 t/m^3 。分别使用水筛法和马尔文 3000 激光粒度测试仪对全尾砂进行粒径分析,粒级分布曲线如图 1 所示。尾砂平均粒径 $d_{av} = 31.3 \mu\text{m}$,在 $30 \sim 37 \mu\text{m}$,小于 $19 \mu\text{m}$ 的为 39.77% ,在 $20\% \sim 55\%$,符合中细尾砂的分级标准,中间粒径比例较少,两端粒径比例较多,级配不均。

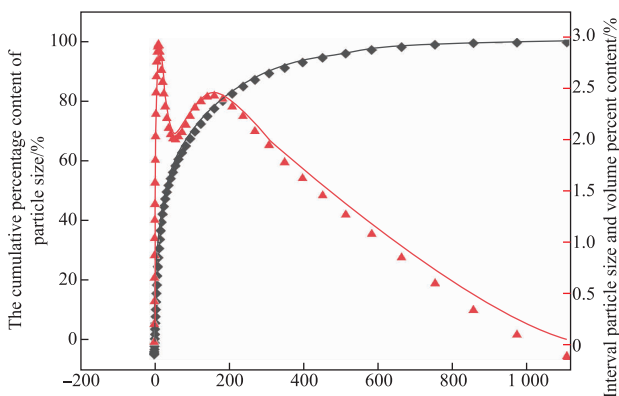


图1 粒径分布曲线

Fig. 1 Particle size distribution curves

胶凝材料采用山东黄金集团自主研发的充填 C 料,采用矿渣(水淬炉渣)和激发剂配制而成,真密度 2.8 t/m^3 ,初凝时间 135 min,终凝时间 450 min,比表面积 $560 \text{ m}^2/\text{kg}$, $+80 \mu\text{m}$ 含量 8.4% 。

拌合水为生产水,pH 值为 7.2,Cl 离子含量为 15171.2 mg/L ,近似于海水。

实验所用流变测试设备为美国 Brookfield RST-SST 型流变仪,四叶桨式,执行《全尾砂膏体充填技术规范》(GB/T 39489—2020)附录 A 全尾砂膏体料浆的屈服应力测试方法,转子高度 40 mm、直径 20 mm,500 mL 容积的烧杯。采用截锥圆模参数为上口直径 36 mm、下口直径 60 mm、高度 60 mm。精度不低于 0.01 g 的电子秤。NRJ-411A 型水泥胶砂搅拌机制备充填料浆。

1.2 实验测试方法

分别配制不同质量浓度(70%、72%、74%、76%),灰砂质量比(1:4、1:6、1:8、1:10)的全尾砂充填料浆 16 组,制备完成后立即采用上述流变仪准确测定其料浆的流变参数,获取流变曲线并分析其变化过程。具体测试流程为:按照剪切速率控制

模式(CSR),每项测试周期 6 min,首先设定剪切速率由 0 s^{-1} 线性递增至 $180 \text{ s}^{-1} (\gamma_3)$,根据矿山实际膏体流速范围 $1.5 \sim 1.8 \text{ m/s}$,管道内径 D 为 150 mm ,按照管道阻力计算公式 $\gamma = 8V/D$ 得出料浆的剪切速率, $\gamma_1 \sim \gamma_2$ 为 $80 \sim 96 \text{ s}^{-1}$,剪切持续时间 180 s ,流变测试加载过程如图 2 所示。

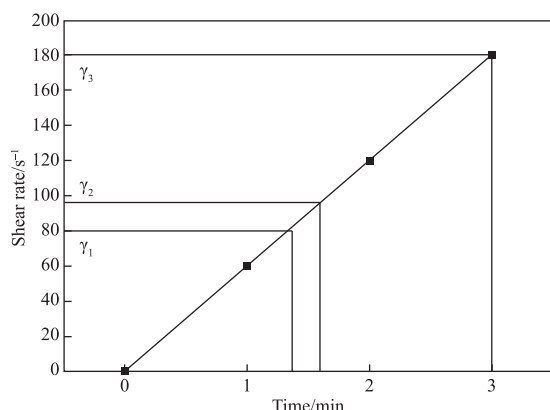


图 2 流变测试加载过程

Fig. 2 Polymer bridging in flocculation

参照《金属非金属矿山充填工程技术标准》(GB/T 51450—2022),采用截锥圆模测定制备完成的充填料浆扩展度。

构建 BP 神经网络模型,分别以充填料浆质量浓度 $X_1(\%)$ 、灰砂比(折算成干料中胶凝材料含量) $X_2(\%)$ 、容重 $X_3(\text{mm})$ 、扩展度 $X_4(\text{N/m}^3)$ 为输入

层的 4 个输入变量参数;输出层确定充填料浆的屈服应力 $Y_1(\text{Pa})$ 、塑性黏度 $Y_2(\text{Pa} \cdot \text{s})$ 为输出参数。通过选取适当隐含层的层数及各隐含层的单元数,结合经验确定隐层神经元数 H_n 为 8,建立神经网络,通过网络的训练与学习,将神经网络的预测和实验结果分析对比,利用相对误差确定计算机模拟和实验测试结果吻合性。

2 全尾砂膏体料浆扩展度实验

扩展度实验主要是为了掌握膏体料浆流动性,研究其保水性和黏聚性。实验所用截锥圆模操作简单、使用方便、用料少、效率高。截锥圆模示意图见图 3。每组重复三次实验取平均值,作为最终的实验结果,以保证实验结果准确,实现可重复。扩展度实验结果见表 1 和图 4。

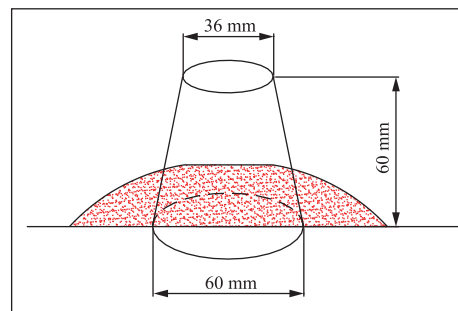


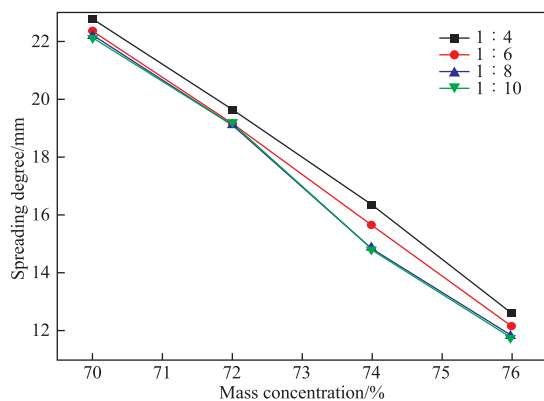
图 3 截锥圆模示意图

Fig. 3 Schematic diagram of truncated circular mold

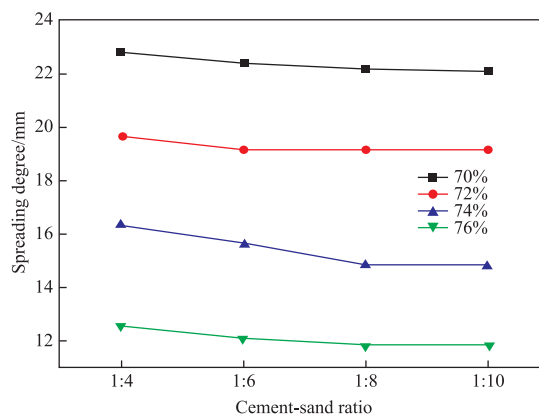
表 1 不同灰砂比和浓度料浆扩展度实验结果

Table 1 Test results of slurry expansion with different lime sand ratios and concentrations

Mass concentration/%	Spreading degree of different lime sand ratios/mm			
	1 : 4	1 : 6	1 : 8	1 : 10
70	22.81	22.40	22.19	22.08
72	19.67	19.18	19.17	19.13
74	16.34	15.62	14.83	14.77
76	12.59	12.11	11.84	11.80



(a) The spread degree of paste slurry with different mass fractions



(b) The spread degree of paste slurry with different lime sand ratios

图 4 不同灰砂比不同浓度膏体料浆扩展度演化规律

Fig. 4 Evolution law of spread degree of paste slurry with different ash sand ratios and concentrations

由表 1 和图 4(a)可知,随着膏体料浆质量浓度的增加,扩展度下降明显,在一定范围内基本呈线性下降;由 4(b)可知,扩展度受灰砂比的影响较小,在相同质量浓度条件下,不同灰砂比膏体料浆的扩展度变化不明显。主要原因是尾砂的粒径和胶凝材料的粒径十分接近,在质量浓度一定下,不同灰砂比不会改变料浆中固含量比例,基本不改变料浆的状态,但随着浓度的提高,会增大料浆中的固含量比例,造成变料浆变稠,扩展度随之降低。

3 全尾砂膏体料浆流变实验

3.1 实验结果数据

严格按照《全尾砂膏体充填技术规范》(GB/T

39489—2020)附录 A 全尾砂膏体料浆的屈服应力测试方法,绘制剪切应力-剪切速率曲线,只取 $\gamma_1 \sim \gamma_2$ 为 $80 \sim 96 \text{ s}^{-1}$ 的剪切应力-剪切速率,根据宾汉姆(Bingham)模型,按照回归计算膏体料浆的屈服应力和塑性黏度。

$$\tau = \tau_0 + \mu_B \gamma \quad (1)$$

式中: τ_0 为屈服应力,Pa; μ_B 为塑性黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; γ 为剪切速率, s^{-1} ; τ 为剪切应力,Pa。

每项实验测试完成后,流变仪会自动保存数据,同时流变仪会自动生成流变曲线和相对性的拟合曲线,还呈现出测试的结果和结论。膏体料浆实验结果数据见表 2,为节约篇幅,只列出质量浓度 70%料浆的剪切应力-剪切速率曲线,见图 5~8。

表 2 料浆扩展度与流变参数测试结果

Table 2 Results of the slurry spread and rheological parameters test

Mass concentration/%	Content of cementitious materials in dry materials/%	Cement-Sand ratio	Unit weight/ ($\text{N} \cdot \text{m}^{-3}$)	Spreading degree/mm	Yield stress/Pa	Plastic viscosity/($\text{Pa} \cdot \text{s}$)
70	20.00	1 : 4	17 745.95	22.81	37.168	0.239 9
	14.29	1 : 6	17 766.52	22.40	37.420	0.197 7
	11.11	1 : 8	17 777.98	22.19	36.649	0.194 3
	9.09	1 : 10	17 785.27	22.08	32.642	0.218 9
72	20.00	1 : 4	18 166.80	19.67	57.121	0.322 1
	14.29	1 : 6	18 188.98	19.18	55.343	0.315 2
	11.11	1 : 8	18 201.33	19.17	53.402	0.288 1
	9.09	1 : 10	18 209.20	19.13	50.791	0.299 3
74	20.00	1 : 4	18 608.10	16.34	83.853	0.441 8
	14.29	1 : 6	18 632.02	15.62	79.878	0.427 7
	11.11	1 : 8	18 645.34	14.83	70.231	0.419 8
	9.09	1 : 10	18 653.82	14.77	70.763	0.402 0
76	20.00	1 : 4	19 071.37	12.59	98.926	0.477 5
	14.29	1 : 6	19 097.18	12.11	92.674	0.554 3
	11.11	1 : 8	19 111.55	11.84	87.844	0.494 0
	9.09	1 : 10	19 120.70	11.80	86.387	0.512 4

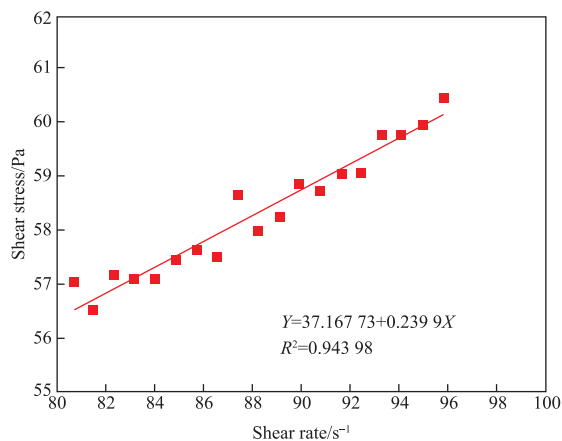


图 5 灰砂比 1 : 4 剪切应力-剪切速率曲线

Fig. 5 Ash sand ratio 1 : 4 shear stress shear rate curve

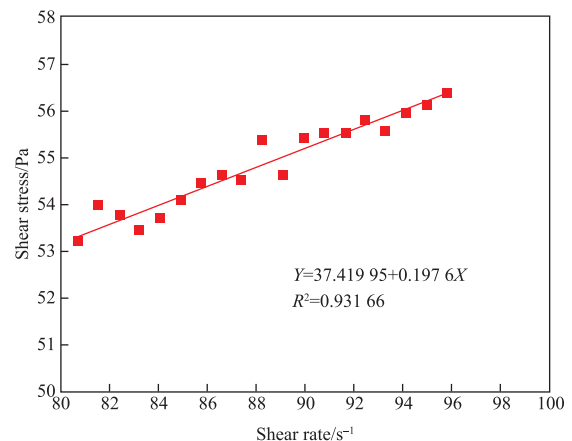


图 6 灰砂比 1 : 6 剪切应力-剪切速率曲线

Fig. 6 Ash sand ratio 1 : 6 shear stress shear rate curve

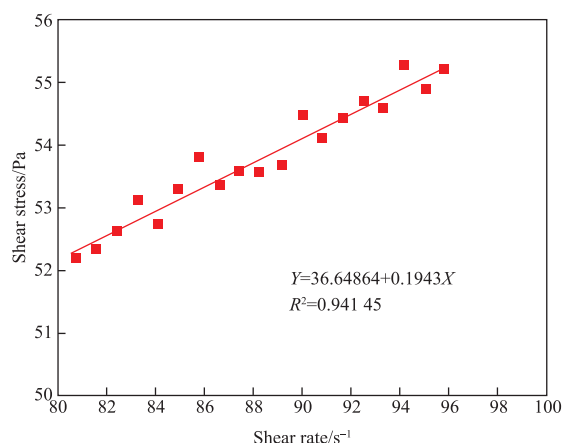


图 7 灰砂比 1 : 8 剪切应力-剪切速率曲线

Fig. 7 Ash sand ratio 1 : 8 shear stress shear rate curve

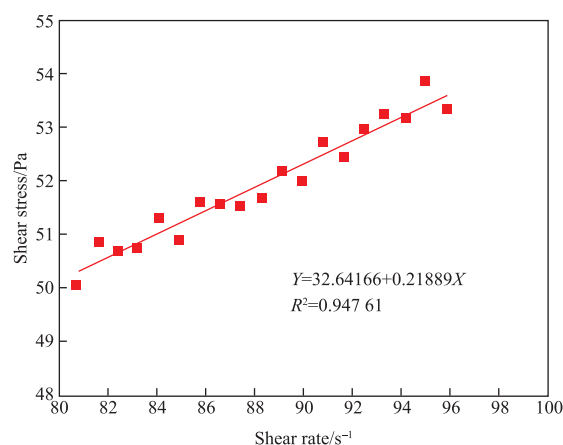


图 8 灰砂比 1 : 10 剪切应力-剪切速率曲线

Fig. 8 Ash sand ratio 1 : 10 shear stress shear rate curve

3.2 实验结果分析

根据表 2 得到的不同质量浓度、不同灰砂比条件下,全尾砂膏体料浆的容重、扩展度和流变参数屈服应力、塑性黏度测试结果,开展了单因素分析、多因素多元线性回归分析及相关性检验。由此得到膏体料浆流变参数屈服应力 Y_1 、塑性黏度 Y_2 的回归方程,建立流变参数模型,回归方程见式(2)和式(3)。

$$Y_1 = -578.185 + 2931.376X_1 + 43.323X_2 - 0.082X_3 + 0.919X_4 \quad (2)$$

$$Y_2 = -1.464 + 6.253X_1 + 0.201X_2 - 1.399X_3 - 0.011X_4 \quad (3)$$

式中: Y_1 为屈服应力,Pa; Y_2 为塑性黏度,Pa·s。 X_1 为充填料浆质量浓度,%; X_2 为灰砂比(折算成干料中胶凝材料含量),%; X_3 为容重,N/m³; X_4 为扩展度,cm。

屈服应力的 R^2 、R-square(调整后 R^2)、 F 值和 P (概率> F 值)分别为 0.988、0.983、220.274、 2.036×10^{-10} 。塑性黏度的 R^2 、R-square(调整后 R^2)、 F 值和 P (概率> F 值)分别为 0.972、0.961、94.494、 1.930×10^{-8} 。料浆屈服应力和塑性黏度的回归方程与测试结果拟合均较好。

结合式(2)和式(3)回归方程可知,膏体料浆流变参数屈服应力和塑性黏度随质量浓度、灰砂比等均呈线性增加,回归结果及误差见表 3。由表 3 可知,实验样本多元回归误差均在 10% 以下,说明式(2)和式(3)具有较高的可靠度。

表 3 流变参数多元回归误差表

Table 3 Error table for multiple regression of rheological parameters

Yield stress			Plastic viscosity		
Actual measurement/Pa	Multiple regression/Pa	Error/%	Actual measurement/(Pa·s)	Multiple regression/(Pa·s)	Error/%
37.168	40.243	8.27	0.239 9	0.222 8	-7.13
37.420	35.696	-4.61	0.197 7	0.212 9	7.69
36.649	33.181	-9.46	0.194 3	0.207 2	6.63
32.642	31.603	-3.18	0.218 9	0.203 3	-7.12
57.121	61.284	7.29	0.322 0	0.323 1	0.34
55.343	56.531	2.15	0.315 0	0.313 8	-0.37
53.402	54.126	1.35	0.288 0	0.305 8	6.19
50.791	52.565	3.49	0.299 0	0.301 1	0.71
83.853	80.464	-4.04	0.441 8	0.422 6	-4.35
79.878	75.356	-5.66	0.427 7	0.415 6	-2.83
70.231	72.153	2.74	0.419 8	0.415 9	-0.92
70.763	70.524	-0.34	0.402 0	0.411 3	2.32
98.926	97.446	-1.50	0.477 5	0.523 6	9.65
92.674	92.403	-0.29	0.554 3	0.513 7	-7.32
87.844	89.592	1.99	0.494 0	0.508 2	2.88
86.387	87.926	1.78	0.512 4	0.503 3	-1.77

根据回归分析结果,由图9、图10可知,料浆质量浓度是影响流变特性的主要因素,灰砂比一定时,随着质量浓度的增大,屈服应力和塑性黏度均大幅增加,扩展度与质量浓度有直接关系;而当质量浓度一定时,不同灰砂比料浆的屈服应力和塑性黏度变化较小,基本呈水平状态;特别是在72%~74%时,灰砂比、料浆容重和扩展度对流变参数影响较小。

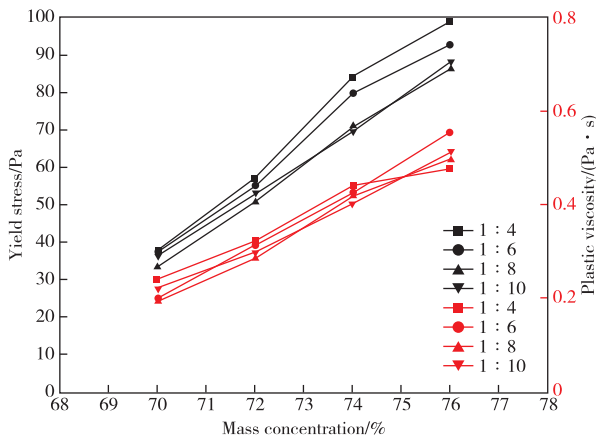


图9 不同浓度屈服应力和塑性黏度曲线

Fig. 9 Yield stress and plastic viscosity curves at different concentrations

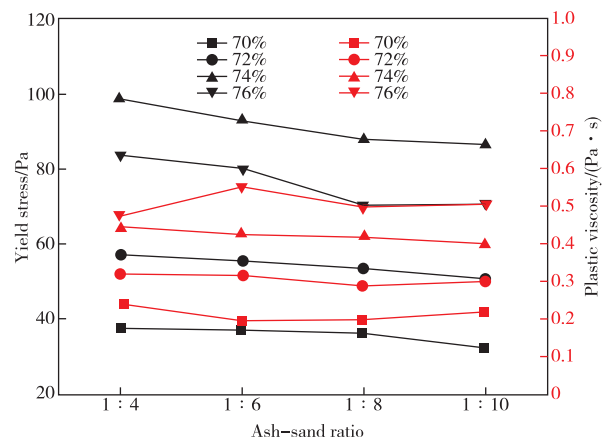


图10 不同灰砂比屈服应力和塑性黏度曲线

Fig. 10 Yield stress and plastic viscosity curves for different lime sand ratios

4 全尾砂膏体料浆流变实验

根据16组实验得到的不同质量浓度、灰砂比和对应容重、扩展度的膏体料浆屈服应力和塑性黏度,按照神经网络模型中输入与输出存在特殊的映射关系,将其中的12组作为训练样本,抽取1、5、11作为检测样本,利用BP神经网络进行训练和测试,得到预测结果见表4。

由图11、图12和表4可知,BP神经网络预测归

表4 BP网络测试样本数据预测结果

Table 4 BP network predictive results of the test sample data

Serial number	Yield stress					Plastic viscosity				
	Experiment t /Pa	BP network simulation value/%	Error/%	Multiple regression values/Pa	Error/%	Experiment/ (Pa·s)	BP network simulation value/%	Error/%	Multiple regression values/(Pa·s)	Error/%
1	37.168	37.168	-0.02	40.243	8.27	0.2399	0.2399	0.33	0.2228	-7.13
2	55.343	55.343	0.76	56.531	2.15	0.3150	0.3150	0.48	0.3138	-0.37
3	70.231	70.231	0.10	72.153	2.74	0.4198	0.4198	0.17	0.4159	-0.92

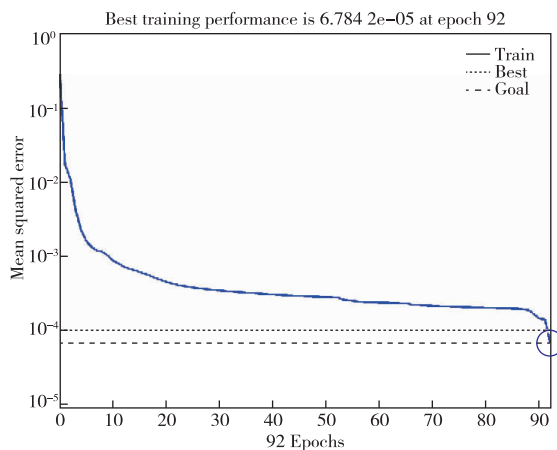


图11 BP神经网络训练误差曲线(92计算步)

Fig. 11 BP neural network training error curve(92 calculation steps)

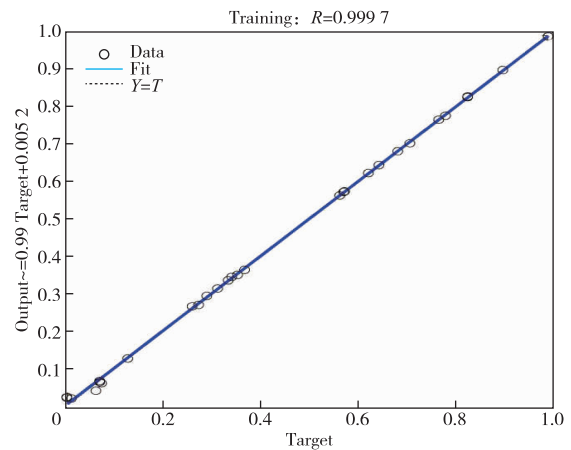


图12 神经网络验证误差曲线

Fig. 12 Verifying error curve of neural network

一化值与实验结果的数值大小十分接近,BP 神经网络对屈服应力、塑性黏度的仿真值最大误差分别为 0.76%、0.48%,较多元线性回归分析的误差 8.27%、-7.13%,明显精确度高。说明适应性较强,误差在可控范围之内。

5 结论

1)通过对某金矿全尾砂、胶凝材料和拌合水基本性质测试,获得了相关技术参数;利用截锥圆模开展了全尾砂膏体料浆扩展度实验发现,扩展度受灰砂比的影响较小,在相同质量浓度条件下,不同灰砂比膏体料浆的扩展度变化不明显。但随着浓度的提高,会增大料浆中的固含量比例,造成变料浆变稠,扩展度随之降低。

2)利用流变仪进行了全尾砂膏体料浆流变参数测试,分析建立了料浆质量浓度、灰砂比、料浆容重、料浆扩展度、对流变参数(屈服应力、塑性黏度)影响的流变函数模型,研究发现料浆质量浓度是影响流变特性的主要因素,料浆的扩展度次之,灰砂比和料浆容重影响最小;当质量浓度处于 72%~74%时,灰砂比、料浆容重和扩展度对流变参数影响较小。

3)建立了料浆屈服应力和塑性黏度多元线性回归方程,回归方程与测试结果拟合均较好,相对误差均在 10%以内,说明具有较高的可靠度;考虑到影响膏体料浆流变参数的因素较为复杂,利用 BP 神经网络原理进行预测和仿真,计算机仿真结果表明所建立的 BP 神经网络模型误差小、能力强,只计算 92 步就很快收敛,实测值与仿真值误差 $<1\%$,可为管输沿程阻力分析和井下充填管网布置提供可靠依据。

参考文献:

- [1] 吴爱祥,王洪江.金属矿膏体充填理论与技术[D].北京:科学出版社,2015:1-2.
WU Aixiang, WANG Hongjiang. Theory and technology of metal ore paste filling [D]. Beijing: Science Press,2015:1-2.
- [2] 杨纪光,王义海,吴再海,等.某金矿全尾砂高浓度充填流变特性与微观结构的分析[J].有色金属科学与工程,2023,14(2):249-256.
YANG Jiguang, WANG Yihai, WU Zaihai, et al. Analysis on rheological characteristics and microstructure of high concentration filling the tailings from a gold mine[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering,2023,14(2):249-256.
- [3] ESWARAIHAH C, BISWAL S K, MISHRA B K. Settling characteristics of ultrafine iron ore slimes[J]. International Journal of Minerals Metallurgy and Materials,2012,19(2):95-99.
- [4] 王勇,王林奇,曹晨,等.基于微型塌落筒实验的充填料浆屈服应力表征[J].工程科学学报,2023,45(8):1316-1323.
WANG Yong, WANG Linqi, CAO Chen, et al. Characterization of filling slurry yield stress based on a mini-slump cone test [J]. Chinese Journal of Engineering,2023,45(8):1316-1323.
- [5] ALDHAFEEER Z, FALL M. Time and damage induced changes in the chemical reactivity of cemented paste backfill[J]. Environ Chem Eng,2016,4(4):4038-4049.
- [6] 吴爱祥,李红,程海勇,等.全尾砂膏体流变学研究现状与展望(下):流变测量与展望[J].工程科学学报,2021,43(4):451-459.
WU Aixiang, LI Hong, CHENG Haiyong, et al. Status and prospects of research on the rheology of paste backfill using unclassified tailings (Part2): rheological measurement and prospects [J]. Chinese Journal of Engineering,2021,43(4):451-459.
- [7] JIANG H Q, FALL M. Yield stress and strength of saline cemented tailings in sub-zero environments: portland cement paste backfill[J]. International Journal of Mineral Processing,2017,160:68-75.
- [8] JIANG H Q, FALL M, CUI L. Yield stress of cemented paste backfill in sub-zero environments: experimental results[J]. Minerals Engineering,2016,92:141-150.
- [9] 裴佃飞,宋泽普,齐兆军,等.基于微型塌落筒和稠度漏斗的膏体充填料浆流变参数预测研究[J].金属矿山,2020,49(4):15-19.
PEI Dianfei, SONG Zepu, QI Zhaojun, et al. Prediction on rheological parameters of pasty backfilling slurry based on mini-slump mould and consistency funnel[J]. Metal Mine,2020,49(4):15-19.
- [10] KOU Y P, JIANG H Q, REN L, et al. Rheological properties of cemented paste backfill with alkali-activated slag[J]. Minerals,2020,10(3):288. DOI:10.3390/min10030288.
- [11] MARN J, TERNIK P. Laminar flow of shear-thickening fluid in a 90° pipe bend[J]. Fluid Dynamics

- Research, 2006, 38(5): 295-312.
- [12] WANG X M, LI J X, XIAO Z Z, et al. Rheological properties of tailing paste slurry[J]. Journal of Central South University of Technology, 2004, 11(1): 75-80.
- [13] 邓代强, 朱永建, 李健, 等. 基于 BP 神经网络的充填料浆流变参数预测分析[J]. 武汉理工大学学报, 2012, 34(7): 82-87.
- DENG Daiqiang, ZHU Yongjian, LI Jian, et al. Rheology parameter forecast analysis of filling slurry based on BP network[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2012, 34(7): 82-87.
- [14] HEYWOOD N I, ALDERMAN N J. Developments in slurry pipeline technologies[J]. Chemical Engineering Progress, 2003, 12(4): 36-43.
- [15] XU Y H, XU X Q, LI J X, et al. High concentration backfilling, its rheologic properties and parameters in gravity flow[C]//The Nonferrous Metals Society of China. Proceedings of the 8th International Symposium on Mining with Backfill. Beijing: 2004: 304-307.
- [16] NEHDI M, RAHMAN M A. Estimating rheological properties of cement pastes using various rheological models for different test geometry, gap and surface friction[J]. Cement and Concrete, Research, 2004, 34(11): 1993-2007.
- [17] WALLEVJK J E. Relationship between the Bingham parameters and slump[J]. Cem Concr Res, 2006, 36(7): 1214-1221.
- [18] TAN Z J, BERNAL S A, PROVIS J L. Reproducible mini-slump test procedure for measuring the yield stress of cementitious pastes[J]. Mater Struct, 2017, 50(6): 235. DOI: 10.1617/s11527-017-1103-x.
- [19] SAAK A W, JENNINGS H M, SHAH S P. A generalized approach for the determination of yield stress by slump and slump flow[J]. Cem Concr Res, 2004, 34(3): 363-371.
- [20] ROUSSEL N. Correlation between yield stress and slump: comparison between numerical simulations and concrete rheometers results[J]. Mater Struct, 2006, 39(4): 501-509.
- [21] 罗涛, 张亮, 姜亮亮, 等. 高浓度全尾砂料浆流变特性参数试验及管道输送研究[J]. 有色金属科学与工程, 2015, 6(4): 86-90.
- LUO Tao, ZHANG Liang, JIANG Liangliang, et al. Testing on the rheological properties of the high-density slurry of the full tailings and its pipeline transportation[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2015, 6(4): 86-90.
- [22] 韦寒波, 高谦. 废石-棒磨砂混合充填料浆工作特性与流变参数试验[J]. 金属矿山, 2020, 49(12): 55-60.
- WEI Hanbo, GAO Qian. Experimental study on working characteristics and rheological parameters of mixed filling slurry of waste rock and rod-mill sand[J]. Metal Mine, 2020, 49(12): 55-60.
- [23] 张修香, 乔登攀. 废石-尾砂高浓度充填料浆流变参数的确定[J]. 矿冶工程, 2018, 38(5): 11-15.
- ZHANG Xiuxiang, QIAO Dengpan. Determination of rheological parameter of slurry backfill composed of waste rock and sand tailings[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2018, 38(5): 11-15.
- [24] 杨纪光, 杜加法, 荆晓东, 等. 某金矿全尾砂膏体充填料浆性能试验研究[J]. 黄金, 2018, 39(10): 32-35.
- YANG Jiguang, DU Jiafa, JING Xiaodong, et al. Experimental study on properties of full tailings paste filling slurry in a gold mine[J]. Gold, 2018, 39(10): 32-35.
- [25] COWLING R. Twenty-five years of mine filling: developments and directions[C]//Sixth International Symposium on Mining with Brislane. Brislane, 1998: 3-10.
- [26] JAU W C, YANG C T. Development of a modified concrete rheometer to measure the rheological behavior of conventional and self-consolidating concretes[J]. Cement & Concrete Composites, 2010, 32(6): 450-460.
- [27] BOGER D V. Rheology and the resource industries[J]. Chemical Engineering Science, 2009, 64(22): 4525-4536.
- [28] 赵成伟, 黄玉诚, 王凯, 等. 神经网络在高浓度充填料浆流变特性中的应用[J]. 有色金属(矿山部分), 2017, 69(4): 90-93.
- ZHAO Chengwei, HUANG Yucheng, WANG Kai, et al. Application of neural network to rheological character of high concentration filling slurry[J]. Nonferrous Metals(Mining Section), 2017, 69(4): 90-93.
- [29] 蔡嗣经, 黄刚, 吴迪, 等. 尾砂充填料浆流变性能模型与试验研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2015, 36(6): 882-886.
- CAI Sijing, HUANG Gang, WU Di, et al. Experimental and modeling study on the rheological properties of tailings backfill[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2015, 36(6): 882-886.
- [30] 刘志祥, 龚永超, 李夕兵. 基于分形理论和 BP 神经网络的充填料性能研究[J]. 黄金科学技术, 2017, 25(2):

38-44.

LIU Zhixiang, GONG Yongchao, LI Xibing. Study on the backfilling material properties based on fractal theory and BP neural network[J]. Gold Science and Technology, 2017, 25(2): 38-44.

- [31] 李立涛, 杨志强, 高谦. 基于正交试验和神经网络的新型充填胶凝材料配比优化[J]. 矿产综合利用, 2018(3): 114-120.

LI Litao, YANG Zhiqiang, GAO Qian. Ration optimization of new filling cementitious material based on orthogonal test and neural network model[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2018(3): 114-120.

- [32] 张修香, 乔登攀. 废石-尾砂高浓度料浆的流变特性及

屈服应力预测模型[J]. 安全与环境学报, 2015, 15(4): 278-283.

ZHANG Xiuxiang, QIAO Dengpan. Rheological property and yield stress forecasting model of high-density slurry with waste rock-tailings[J]. Journal of Safety and Environment, 2015, 15(4): 278-283.

- [33] 杨纪光. 某金矿尾砂合理级配及其膏体料浆流变性质试验研究[J]. 矿业研究与开发, 2020, 40(1): 49-53.

YANG Jiguang. Experimental study on reasonable gradation of tailings and rheological properties of paste slurry in a gold mine[J]. Mining Research and Development, 2020, 40(1): 49-53.

(编辑 郭文晶)

(上接第 88 页, Continued from P88)

- [17] 刘优平, 龚敏, 黄刚海. 深孔爆破装药结构优选数值分析方法及其应用[J]. 岩土力学, 2012, 33(6): 1883-1888.

LIU Youping, GONG Min, HUANG Ganghai. Numerical analysis method for optimizing charging structure of deep-hole blasting and its application[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(6): 1883-1888.

- [18] DONZEF V, BOUCHEZ J, MAGNIER S A. Modeling fractures in rock blasting[J]. International Journal of

Rock Mechanics and Mining Sciences, 1997, 34(8): 1153-1163.

- [19] ESEN S, ONEDERRA I, BILGIN H A. Modeling the size of the crushed zone around a blast hole[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2003, 40(4): 485-495.

(编辑 郭文晶)