

膏体充填

# 搅拌过程电信号的充填料浆质量浓度表征研究

Study on the Characterization of the Mass Concentration of Filling Slurry Using  
Electrical Signals During the Stirring Process

李立涛<sup>1,2</sup>, 陈小伟<sup>1,2</sup>, 夏长念<sup>1,2</sup>

(1. 中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038;

2. 金属矿膏体充填安全绿色开采国家矿山安全监察局重点实验室, 北京 100038)

**摘要:**为了实现电信号反馈的充填料浆质量浓度稳定调控,开展基于搅拌过程电信号的充填质量浓度表征研究。设计并进行不同质量浓度的全尾砂充填料浆搅拌特性试验,采集搅拌过程扭矩、功率、电流等电信号数据,采用卡尔曼滤波方法对原始数据进行降噪预处理。试验结果显示,三种搅拌电信号随全尾砂充填料浆质量浓度的变化而呈较为明显的正相关关系,料浆质量浓度从68%增加到76%时,扭矩、功率、电流信号数值分别增大了22%、29%、20%,浓度每增加1%,三种电信号数值具有显著差异性;基于此,开展了搅拌电信号随料浆质量浓度的演化规律研究,揭示了充填料浆质量浓度与搅拌电信号的内在关系,发现了搅拌电信号在料浆临界浓度附近的突变与连续特性,进而提出了搅拌电信号与料浆质量浓度的相关模型,并进行深入分析与研究,明确了基于搅拌过程电信号的充填料浆浓度表征方法与模型及参数等内容,为实现搅拌过程电信号反馈的充填料浆质量浓度稳定调控技术奠定基础。

**关键词:**电信号; 浓度; 扭矩; 演化规律; 表征模型

中图分类号: TD989

文献标志码: A

文章编号: 1672-609X(2024)06-0061-07

**Abstract:** In order to achieve stable control of filling slurry quality concentration based on electrical signal feedback, a study was conducted on the characterization of filling quality concentration based on electrical signals during the stirring process. Experiments on the mixing characteristics of full tailings filling slurry with different mass concentrations was designed and conducted, collect electrical signal data such as torque, power, current during the mixing process, and the original data was pre-treated to reduce noise using Kalman filtering method. The experimental result shows that the three types of mixing electrical signals present a significant positive correlation with the change of full tailings filling slurry mass concentration. When the slurry mass concentration increases from 68% to 76%, the values of torque, power, and current signals increase by 22%, 29%, and 20%, respectively. For every 1% increasing, the values of the three electrical signals show significant differences; Based on this, a study was conducted on the evolution law of stirring electrical signals with the mass concentration of slurry, revealing the inherent relationship between the mass concentration of filler slurry and stirring electrical signals, the sudden and continuous characteristics of stirring electrical signals near the critical concentration of slurry were discovered, and a related model of stirring electrical signals and slurry mass concentration was proposed and was analyzed and studied in depth, finally, the characterization method, model, and parameters of filler slurry concentration based on stirring process electrical signals were clarified, laying the foundation for achieving stable control technology of filler slurry mass concentration through electrical signal feedback during the stirring process.

**Key words:** electrical signal; concentration; torque; evolutionary laws; representational model

[作者简介] 李立涛(1989—),男,工程师,主要从事非煤矿山工程设计与矿山充填研究工作。

[基金项目] 国家重点研发计划“高应力下金属矿规模化低放热高强充填体的成型技术与装备(课题项目号:2023YFC2907203)。

[引用格式] 李立涛,陈小伟,夏长念. 搅拌过程电信号的充填料浆质量浓度表征研究[J]. 中国矿山工程,2024,53(6):61-67.

## 1 前言

矿山胶结充填是一个多学科交叉的系统工程,充填料浆的制备与输送是其重要构成部分,决定胶结充填的技术发展与质量控制<sup>[1-2]</sup>。从充填法工艺流程角度来讲,设计阶段,首先根据矿山实际情况,

选择合适的充填材料,综合考虑料浆流变特性,工作特性,充填胶结体力学特性,最终确定临界流态浓度或最优可输送浓度,并尽量保证高浓度充填<sup>[3-4]</sup>;在制备环节,充填料浆下料浓度的稳定输出,不仅利于管道输送的安全高效,减少管道磨损,防止堵管泄露等问题,更与采场充填体的整体性和均匀性密切相关,因此料浆在制备环节质量浓度的稳定输出,很大程度上决定了料浆管道输送及采场充填性能<sup>[5]</sup>。制备环节依托搅拌设备与自动控制系统,总体可分为三个阶段:进料阶段、搅拌阶段、下料阶段。不考虑来料的稳定与否,先进的反馈控制系统是解决该共性问题的关键技术手段<sup>[6]</sup>。从自动化角度来解决充填料浆制备阶段的稳定输出,目前的反馈调节存在明显的滞后性<sup>[7]</sup>,加之充填材料不稳定输入的影响,因此基于下料阶段的料浆浓度反馈调控进料阶段,不具有先进性,而搅拌阶段的料浆质量浓度反馈调节可尽量避免下料口反馈调节的滞后性,提前识别充填料浆制备浓度,极大限度的缩短料浆的反馈调节时间,进而尽可能的实现下料阶段的稳定输出<sup>[8]</sup>。搅拌阶段的反馈调节,由于搅拌设备的扰动,直接获取料浆在设备中的质量(浓度)较为困难,因此应首先基于其他参数的料浆浓度表征,然后以该参数为调节目标,开展进料口的实时调节,以期满足充填料浆制备阶段下料口的稳定输出。

为了实现搅拌过程反馈的充填料浆质量浓度稳定调控技术,本文开展搅拌阶段充填料浆质量(浓度)表征技术研究,旨在通过试验手段研究充填料浆质量浓度与搅拌过程电信号之间的内在关系,揭示电信号与充填料浆质量浓度的规律,最终建立充填料浆浓度与电信号(电流、扭矩、功率)模型,为基于搅拌阶段的充填料浆质量智能精准调控系统的实现奠定技术基础。

## 2 试验材料与方案

### 2.1 试验方案

本次试验开展全尾砂充填料浆搅拌特性研究,旨在研究充填料浆搅拌过程的扭矩、功率、电流信号演化规律,为基于搅拌信号参数表征充填料浆浓度奠定基础。具体的试验方案见表1。采用经过改造具备采集搅拌电信号功能的试验用卧室搅拌机,表1为全尾砂充填料浆搅拌试验方案,为了研究基于搅拌信号的充填料浆浓度表征技术,主要改变浓度

参数,试验以质量浓度为影响因素,试验起始浓度为68%,终止浓度为76%,浓度梯度为1%。

表1 全尾砂充填料浆配比

序号	胶砂比	浓度/%
W1		68
W2		69
W3		70
W4		71
W5	1:4	72
W6		73
W7		74
W8		75
W9		76

### 2.2 试验材料粒径分布

水泥和尾砂烘干后采用激光粒度分析仪直接测量,根据试验方案的材料组成,得到胶砂比1:4条件下的全尾砂+水泥种混合材料粒径分布,具体如图1所示,特征粒径见表2。

由图1可知,全尾砂和水泥作为细粒级材料,粒径在细及超细范围内连续性较好。针对研究方案中混合材料的粒径分布,由表2可知,全尾砂+水泥小于20 μm颗粒含量占比约40%,细颗粒含量较大,混合材料属于超细颗粒群。

曲率系数Cc是反映粒径级配累计曲线的斜率是否连续的指标系数。它能反映粒径分布曲线上的颗粒分布形状以及反映颗粒搭配的好坏。不均匀系数Cu是限制粒径与有效粒径的比值,是反映组成颗粒均匀程度的一个指标。不均匀系数一般大于1,Cu越大,表示粒组分布越广,但Cu过大,表示可能缺失中间粒径,属不连续级配,故需同时用去曲率系数来评价。Cu值越大,级配曲线越平缓,颗粒粒径分布范围越广,颗粒越不均匀,越容易压实,Cu值越小,级配曲线越陡峻,粒径分布范围越狭窄,越不易被压实。通常情况下,不均匀系数可以反映颗粒的级配好坏,但无法反映粒径的连续情况,这时仅用不均匀系数来反映,就可能得出错误的结论,而曲率系数Cc能反映颗粒之间的搭配好坏,比如颗粒群缺乏中间粒径,在级配曲线表现为台阶状,充填材料中的Cu如果偏大,其粗细颗粒就容易离析,影响充填质量<sup>[9-10]</sup>。通过计算得知,当所缺少的中间粒径大于连续级配曲线中的 $d_{30}$ 时,曲率系数变小,当所缺少的中间粒径小于连续级配曲线的 $d_{30}$ 时,曲率系数变大。因此,当级配连续时,Cc的范围约为1~3。

全尾砂 + 水泥混合充填材料的曲率系数  $C_c$  为 1.17, 不均匀系数为 14.87, 从材料粒径分布角度来说, 基本满足矿山对充填料浆中固体颗粒级配连续性的要求。

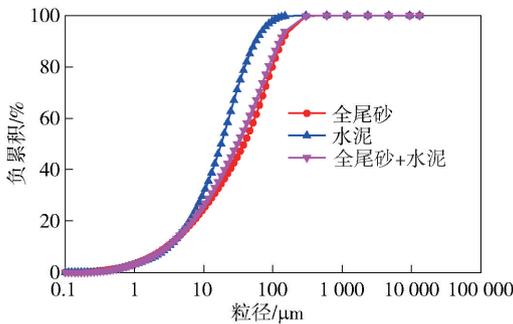


图1 试验材料粒径分布

表2 试验所用配比特征粒径

名称	特征粒径/ $\mu\text{m}$					-20 $\mu\text{m}/\%$
	$d_{10}$	$d_{30}$	$d_{50}$	$d_{60}$	$d_{90}$	
全尾砂	3	12.5	30.4	44.6	124.6	40

### 2.3 试验操作过程

充填料浆在外界搅拌动力的作用下要产生流动, 必须克服其内在物料间的摩擦力以及颗粒间的黏聚力等阻力, 颗粒间的黏聚力大小主要取决于颗粒之间的间距, 而影响颗粒之间间距主要为充填料浆的质量浓度。加料顺序参照矿山较常用的充填工艺, 试验时首先将水泥加入水中进行搅拌, 形成水泥浆体, 其次加入其他充填材料, 全尾砂充填料浆, 开机前加入对应质量的充填用水, 开机后立刻加入水泥搅拌 1 min 后, 加入全尾砂形成完整的全尾砂充填料浆进行搅拌, 整个过程各传感器采集相应的参数, 直至各信号值变化浮动较小或不再发生变化时停止搅拌。

## 3 试验结果分析

### 3.1 试验信号采集结果

全尾砂充填料浆搅拌过程根据确定的加料方式开展, 试验结束的标志是当各信号值不再明显变化时, 搅拌设备停机。电流电压传感器每 1 s 采集一个数据, 扭矩传感器每 1 s 采集两个数据。采集到的电流电压数据经过上述方式进行预处理, 得到最终电流数据。图 2 所示为全尾砂充填料浆搅拌信号采集数值曲线, 其中 a、b、c 分别代表搅拌过程中扭矩、功率、电流信号等特征。

加料顺序的进行, 各曲线特征发生明显变化, 在仅有水泥搅拌的过程中, 各信号值处在一定范围内, 当逐渐加入全尾砂时, 各信号值逐渐增加至另一个取值水平。并且可以看出, 随着浓度的增加, 相同条件下的各信号值依次增加, 成正比关系, 随着充填料浆组成物料的完整加入, 搅拌信号特征发生明显变化, 并且浓度的不同引起各搅拌参数数值的相应变化。但搅拌过程采集到的原始数据存在较大波动以及噪声数据, 因此, 欲充分利用搅拌过程电信号并基于搅拌信号表征充填料浆浓度, 需对采集的原始数据进行降噪处理。

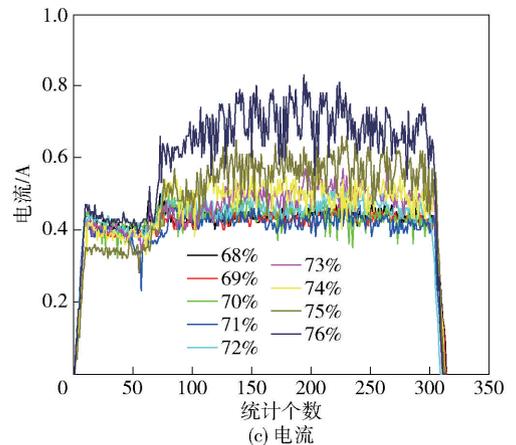
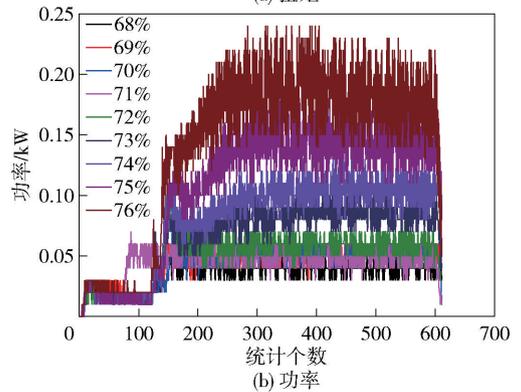
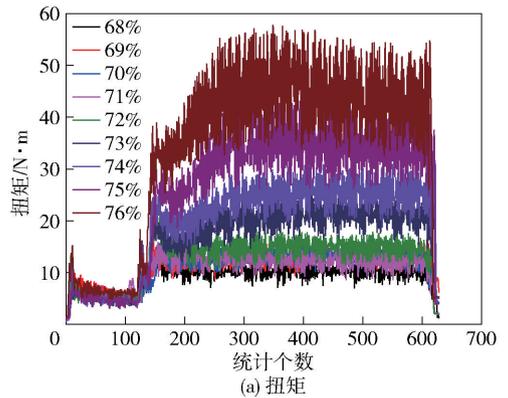


图2 全尾砂充填料浆搅拌信号原始数据

由图 2 可知, 全尾砂充填料浆搅拌试验时, 随着

### 3.2 数据降噪处理

随着传感技术、机器人、自动驾驶以及航空航天等技术的不断发展,对控制系统的精度及稳定性的要求也越来越高。卡尔曼滤波作为一种状态最优估计的方法,其应用也越来越普遍,如再无人机、机器人等领域均得到了广泛应用<sup>[11-12]</sup>。假设一离散线性动态系统的模型为

$$x_k = Ax_{k-1} + Bu_k + w_{k-1}$$

$$z_k = Hx_k + v_k$$

式中, $x_k$ 为系统状态矩阵; $z_k$ 为状态阵的观测值(实测); $A$ 为状态转移矩阵; $B$ 为控制输入矩阵; $H$ 为状态观测矩阵; $w_{k-1}$ 为过程噪声; $v_k$ 为测量噪声。

卡尔曼滤波作为一种状态最优估计算法,与《现代控制系统》中的观测器设计思维类似,都是利用观测值并结合系统的模型来对系统的状态进行估计。但二者又有不同,由前面的介绍可知卡尔曼滤波的目的是利用卡尔曼增益来修正状态预测值,而观测器设计的目的是当系统的有些状态信息无法有效获取或不易测得时,通过状态重构,以便实现反馈控制。基于卡尔曼滤波原理,编写相应程序,对上述试验中各搅拌参数原始数据开展卡尔曼滤波降噪处理,具体如图3所示,最终得到全尾砂充填料浆搅拌参数的精确变化规律。

由图3可知,基于卡尔曼滤波后的充填料浆搅拌信号波动较小,同时信号数值可较好的反映随着加料过程,并且随浓度的改变,各搅拌信号随之发生明显变化,料浆质量浓度从68%增加到76%时,扭矩、功率、电流信号数值分别增大了22%、29%、20%,浓度每增加1%,三种电信号值具有显著差异性,相对其他两种信号,由于收到电网电压和周围磁场等的影响,电流信号波动较大。充填料浆全组分搅拌过程的各信号参数可完整有效的反映充填料浆浓度情况,因此,基于搅拌信号的充填料浆浓度表征至关重要,选择滤波后充填料浆全组分搅拌过程各信号的加权平均值作为该搅拌工况下对应的充填料浆搅拌信号值。全尾砂充填料浆搅拌过程电信号试验结果见表3。根据管道自流输送要求,一般情况下塌落度在18~25 cm范围内可满足输送,由表3可知,全尾砂充填料浆在质量浓度为72%时,塌落度为25.5 cm,大于上限数值。因此,从塌落度角度来说,全尾砂充填料浆浓度72%,可作为研究基于搅拌信号的充填料浆浓度表征的关键变化点。

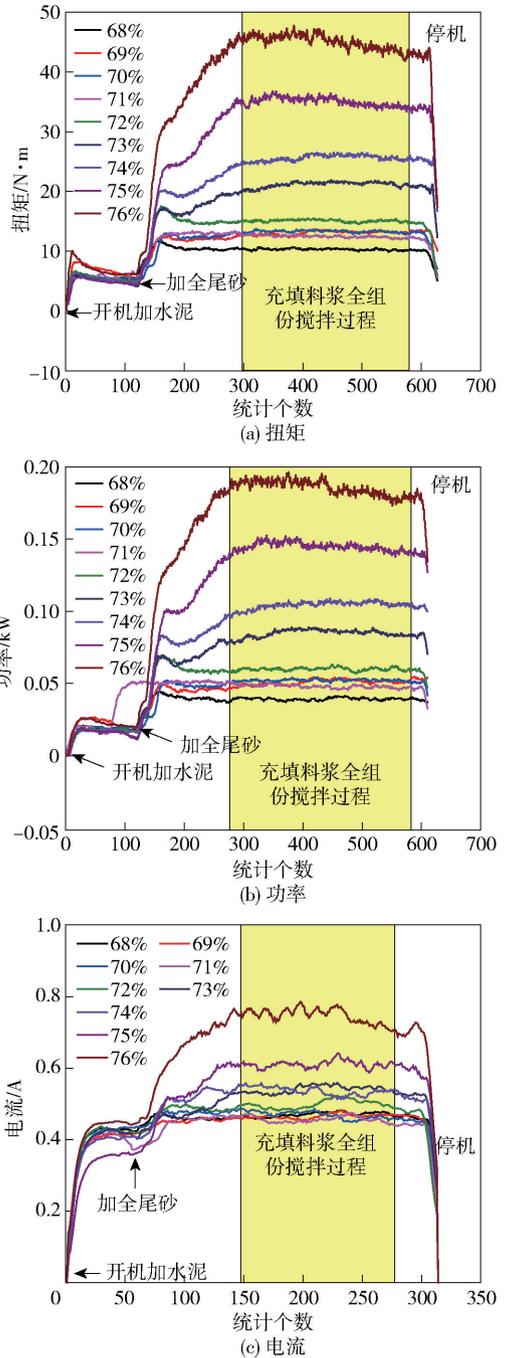


图3 全尾砂充填料浆搅拌信号滤波后变化规律

## 4 基于搅拌信号的充填料浆浓度表征研究

### 4.1 充填料浆搅拌电信号演化规律

研究发现,用流动指数预测临界浓度的方法有其局限性,许多学者在分别计算临界浓度的过程中,发现浆体浓度与n值之间的关系曲线类型不固定,拟合求解比较麻烦。就全尾砂充填料浆而言,由图4可知,料浆浓度在68%~76%之间变化时,各搅拌信号在72%之前一直保持在低水平,然后在72%附

表3 配合比A 充填料浆搅拌试验结果

序号	浓度/%	塌落度/cm	电流/A	扭矩/N·m	功率/kW
W1	68	28.8	0.4567	10.27	0.039
W2	69	27.1	0.4658	12.46	0.048
W3	70	26.3	0.4694	13.03	0.051
W4	71	26	0.4708	13.27	0.052
W5	72	25.5	0.4994	15.06	0.06
W6	73	22.9	0.5367	21.16	0.085
W7	74	21.4	0.5418	25.58	0.104
W8	75	13	0.6111	35.03	0.155
W9	76	11.2	0.7477	45.06	0.186

近快速升高,这意味着前后两个不同时期存在“突变”现象,从搅拌电信号角度即可认为其为“临界浓度”的表征点<sup>[13-14]</sup>。研究后发现,虽然该点前后两个时期各搅拌信号增长快慢差异较大,但在该点附近仍是连续的,如果能够求得这一浓度变化范围内料浆浓度与各搅拌信号的内在关系,则可为通过该模型预测临界浓度创造条件,更可为搅拌阶段控制充填料浆浓度奠定重要基础。为此,根据曲线变化形态,选取3种函数模型,以搅拌扭矩信号为例进行非线性拟合,结果如图5所示。

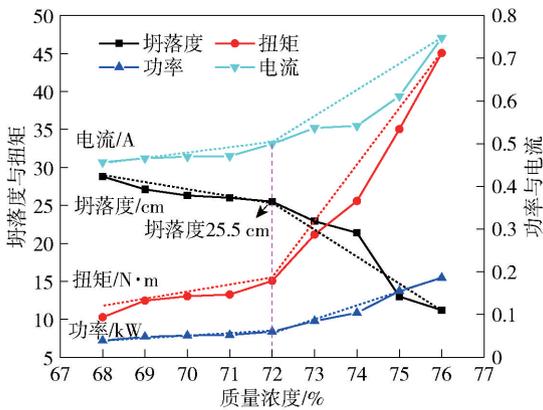


图4 全尾砂充填料浆搅拌信号与浓度变化过程

#### 4.2 搅拌扭矩信号变化过程

从拟合结果可以看出,3种拟合函数 Ploy4、DoseResp 和 Logistic 能够较好地拟合试验得到的数据,相关系数均逼近1,具有非常好的精确性。相对来说,Poly4 拟合的相关系数稍大,但 Ploy4 函数虽然在全尾砂充填料浆浓度变化范围(浓度68%~76%)内数据拟合度良好,然而当浓度低于68%或者高于76%时出现“反常”变化,即浓度低值范围内得到的扭矩为负值,浓度高值范围内扭矩却急剧增加,与试验结果不符。DoseResp 和

Logistic 函数两者拟合结果较为接近,拟合曲线几乎一致,考虑到前者拟合度更高,故选取 DoseResp 函数作为充填料浆质量浓度与扭矩信号相关模型初步形式。

如图5所示,DoseResp 特征可知,针对全尾砂充填料浆搅拌扭矩信号与浓度的关系,对于函数本身而言,扭矩  $y = 10.7$  是其下限值, $y = 78.6$  是上限值,而在点(76,45)处函数斜率最大,此点函数斜率值为42.2。该点处的料浆浓度无论升高或者降低,都会对充填料浆制备阶段搅拌参数产生显著影响。有研究认为料浆的屈服应力开始快速增加时的浓度为临界浓度,却没有考虑在料浆浓度的全部范围内屈服应力的变化规律,取值相对保守。据该全尾砂充填料浆的塌落度角度判断,若是认为临界浓度点在72%,其所对应的搅拌扭矩为15.06 N·m,将远低于该函数形式表征的斜率最大值点(该点扭矩为45 N·m)。

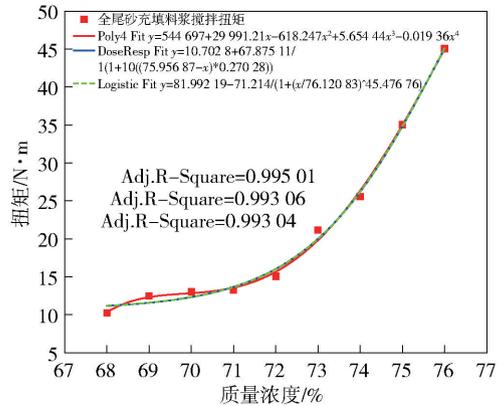


图5 全尾砂充填料浆搅拌扭矩信号与浓度的关系

从料浆浓度对搅拌扭矩影响的角度出发,该临界点对应的浓度即为临界浓度。以该点为分界线,低于该点浓度的区域为第一阶段,扭矩增长速率不断增加,并在该点附近达到峰值;高于该点浓度的区域为第二阶段,扭矩增长速率不断减小,并无限趋于0。因此,由该函数形式可以得出结论,全尾砂充填料浆的临界浓度为76%,但是此时其塌落度变为11.2 cm,显然不利于管道输送,通过该函数得到的临界浓度随与实际情况有所差距,但为高浓度充填料浆的配比设计提供了更加直观参考。

结合图5可知,当料浆浓度偏小或偏大时,搅拌扭矩分别趋近于极小值10.7,并且将会趋近于极大值78.58。料浆在浓度达到饱和状态时扭矩增长放缓,并趋近于某值时符合经验与搅拌过程的规律,因

为水分过少时,固体成分含量对扭矩的影响将不再是关键因素,此时搅拌过程的阻力主要由固体成分间的摩擦导致。料浆浓度较低时,由图5可知,搅拌扭矩趋近于一个极小值,这是因为低浓度时固体成分间距较大,相互作用较弱,对扭矩的增长的作用有限。

### 4.3 充填料浆浓度表征模型

因此,基于上述研究,利用搅拌阶段的电信号表征充填料浆浓度,不仅在函数模型上精度较高,而且很明显的得到了充填料浆搅拌过程信号的演化规律。充填料浆的搅拌电信号变化的范围是确定且可预测的,同时能很好的代表浓度数值的变化,进而求解出搅拌信号随充填料浆浓度演化模型,可为基于搅拌信号的充填料浆浓度反馈调控奠定基础。

由上述研究和分析可知,充填料浆在进行搅拌时,如图6所示,搅拌信号的演化规律大概分三个阶段,分别为充填料浆较低浓度范围演化阶段1,充填料浆临界浓度范围演化阶段2(A点对应为充填料浆临界浓度)与充填料浆较高浓度范围演化阶段3。为此,提出充填料浆在搅拌过程中搅拌信号与浓度的关系模型形式如下:

$$y = a + b / (1 + 10^{((c-x)n)})$$

式中: $y$ 为制备阶段充填料浆搅拌信号,包括但不限于扭矩,功率,电流等; $x$ 为充填料浆制备浓度; $a, b, c, n$ 为与充填料浆固体材料特性,设备类型相关系数,具体数值根据实际情况获得。

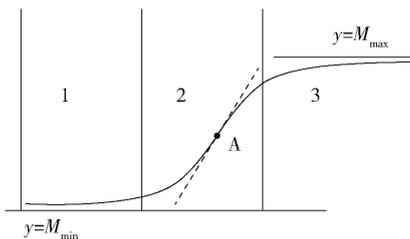


图6 基于搅拌信号表征模型特征

如图6所示A点,该点处的料浆浓度无论升高或者降低,将对充填料浆搅拌信号数值影响较大,如果将该点作为某种充填料浆的临界浓度点,那么公式中的参数 $c$ 将会确定,但事实上,前面的研究结果显示,此数值普遍大于实际的临界浓度,故获得该函数参数 $c$ 值与实际临界浓度的修正关系是前提。由于参数 $a$ 与参数 $b$ 是和极小值及极大值相关的参数,因此,同时掌握搅拌信号趋近于的极小值及极大值与基于工业装备的充填料浆实际临界浓度试验搅

拌信号数值之间的关系,那么基于工业装备只需要开展一组充填料浆搅拌试验,将确定4个参数中的3个,仅剩参数 $n$ 需要一组试验需要确定。故该基于搅拌电信号的充填料浆浓度表征模型具有可实施性。

## 5 结论

通过搅拌过程电信号的充填料浆质量浓度表征研究,获得以下结论:

(1)全尾砂充填料浆搅拌试验研究发现,充填料浆在搅拌过程中会存在临界浓度的突变点及变化,可在相应的搅拌信号(扭矩、功率、电流)变化规律中体现出来,但电流信号受到周围磁场、电网电压等多因素影响较明显,信号数值波动较大,尤其在工业应用的复杂环境中,对充填料浆浓度的精准表征较不可靠,因此,基于搅拌扭矩与搅拌功率的充填料浆浓度表征具有可行性,为基于搅拌阶段控制充填料浆浓度提供重要依据。

(2)全尾砂充填料浆在搅拌扰动下集的电信号原始数据波动较大,在应用时需进行滤波降噪预处理,降噪后的信号数据变化规律较明显,并具有显著的差异性,可为基于搅拌电信号的充填料浆浓度表征技术奠定基础。

(3)基于充填料浆搅拌特性建立的充填料浆浓度表征模型,不仅在函数模型上精度较高,而且很明显的得到了充填料浆搅拌过程信号的演化规律,因此充填料浆的搅拌信号变化是确定可预测的且能精准的反应不同浓度数值的变化。

(4)为了增加模型使用过程的精确性,基于搅拌电信号的充填料浆浓度表征模型中各参数需要根据矿山充填料浆搅拌过程中的具体情况而确定,影响因素包括充填料浆固体材料物理特性,搅拌设备类型,同时结合试验确定该模型参数。

### [参考文献]

- [1] 于润沧. 金属矿山胶结充填理论与工程实践[M]. 冶金工业出版社, 2020.
- [2] 于润沧. 我国胶结充填工艺发展的技术创新[J]. 中国矿山工程, 2010, 39(5):1-3.
- [3] 高通, 孙伟, 彭朝智, 等. 云南某锡矿全尾砂充填料浆流变参数研究[J]. 有色金属工程, 2022, 12(3): 129-137.
- [4] 王洪江, 杨柳华, 王勇, 等. 全尾砂膏体多尺度物料搅拌均质化技术[J]. 武汉理工大学学报, 2017, 39(12):76-80.

- [5] 王海昶,董峰,郭利杰,等.多元粗骨料膏体稳态制备系统研究[J].中国矿业,2022,31(S1):275-279,283.
- [6] 周英烈.混合尾砂膏体充填料浆搅拌特性工业试验[J].有色金属(矿山部分),2023,75(6):1-9
- [7] 喻甜,曾露,尹胜.某金属矿一键充填系统研究与应用[J].现代矿业,2023,39(11):204-208.
- [8] 刘军,吴海宝,陈君德.矿山充填搅拌站的模糊协调控制[J].工业控制计算机,2022,35(12):85-87.
- [9] 李华,李同录,张亚国,等.不同干密度压实黄土的非饱和渗透性曲线特征及其与孔隙分布的关系[J].水利学报,2020,51(8):979-986.
- [10] 张连富,王洪江,吴爱祥,等.颗粒粒径对尾砂膏体触变性的影响[J].工程科学学报,2023,45(1):1-8.
- [11] 顾亚文.基于卡尔曼滤波的电子信息数据异常检测系统[J].自动化技术与应用,2023,42(12):95-98.
- [12] 胡坤,张冰战,刘忠涛,等.基于改进扩展卡尔曼滤波算法的SOC估算[J].汽车实用技术,2023,48(23):6-13.
- [13] 张连富,吴爱祥,王洪江,等.尾矿膏体屈服应力演化规律[J].中国有色金属学报,2018,28(8):1631-1636.
- [14] FALL M, CELESTIN J, HAN F S. Potential use of densified polymer-pastefill mixture as waste containment barrier materials [J]. Waste Management, 2010, 30(12): 2570-2578.

(上接第60页)

- [3] 邹全乐,王鑫,李左媛,等.木质素磺酸钙对固井水泥石变形破坏特性的影响及其改性机制[J].煤炭学报,2023,48(4):1606-1621.
- [4] 武兆鹏.多复合关键层破断规律及含夹矸高韧性顶煤弱化技术研究[D].徐州:中国矿业大学,2022.
- [5] 梁运培,刘莹,邹全乐,等.纳米氧化铝改性地面井固井水泥水化机制研究[J].煤炭科学技术,2024,52(7):68-78.
- [6] 邹全乐,林柏泉,郑春山,等.基于响应面法的钻割一体化喷嘴稳健性优化[J].中国矿业大学学报,2013,42(6):905-910.
- [7] 郭明功,双海清,刘思博.基于散斑监测的抽采钻孔变形破坏特征试验研究[J].煤矿安全,2023,54(7):130-136.
- [8] 张天军,景晨,张磊,等.含孔试样孔周破坏的应变局部化特征[J].煤炭学报,2020,45(12):4087-4094.
- [9] 李立华,陈勇.瓦斯抽采大直径深孔钻进工程响应特性[J].安全与环境工程,2022,29(3):71-77+85.
- [10] 刘虎.基于流固耦合模型瓦斯抽采钻孔参数优化研究[J].中国矿山工程,2023,52(1):54-59.
- [11] 焦稳锋,董亚楠,易辉.瓦斯抽采钻孔孔周煤岩体损伤破坏试验[J].陕西煤炭,2024,43(6):28-33,69.
- [12] 郝志勇,周正啟,潘一山.煤体应力与钻杆转速关系的试验研究[J].采矿与安全工程学报,2019,36(1):158-165.
- [13] 黄长国.深部松软煤层钻孔孔周煤体变形产渣特征研究[J].煤炭工程,2020,52(4):92-96.
- [14] 徐超,秦亮亮,王凯,等.非均匀应力场瓦斯抽采钻孔扰动煤体变形破坏特征[J].煤炭学报,2023,48(4):1538-1550.