

充填

# 充填料浆制备浓度前馈调控工艺及技术途径

Feedforward Control Process and Technical Approach for Filling Slurry Preparation Concentration

朱瑞军<sup>1,2</sup>, 李立涛<sup>1,2</sup>, 夏长念<sup>1,2</sup>, 陈庆刚<sup>1,2</sup>, 张海胜<sup>1,2</sup>, 郝 硕<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:** 本文总结分析了常见充填料浆制备浓度控制系统现状与问题, 提出了基于搅拌扭矩信号的充填料浆制备浓度前馈调控工艺, 并详细阐述了其技术实现途径, 以期为矿山大规模大流量充填料浆稳定制备提供指导和借鉴。

**关键词:** 制备浓度; 前馈调控; 实现途径; 浓度表征

中图分类号: TD421 文献标志码: A 文章编号: 1672-609X(2024)01-0036-05

**Abstract:** The article summarizes and analyzes the current situation and problems of common concentration control systems for filling slurry preparation, proposes a concentration feedforward stable control process for filling slurry preparation based on stirring torque signals, and elaborates on its technical implementation approach in detail, in order to provide guidance and reference for the large-scale and high-flow stable preparation in mines.

**Key words:** preparation concentration; feedforward regulation; implementation approach; concentration characterization

## 1 前言

矿山充填料浆制备浓度的稳定输出, 既是满足充填料浆浓度在管道中稳定输送的前提条件, 又是充填料浆稳定制备的必然要求。充填料浆浓度在设计阶段, 综合考虑矿山充填材料及成本, 采矿工艺与围岩特性等条件, 设计出满足矿山充填要求的输送浓度进行工业制备, 经管道输送至采场或空区实现充填目的。因此, 制备充填料浆时控制输送浓度的实时稳定至关重要<sup>[1-2]</sup>。

充填料浆按照设计输送浓度进行制备时, 一般包括两种自动调节系统, 分别为进料过程的开环控制系统, 用于控制各种充填材料按配比要求的计量并实时进行调节, 虽然可严格按照充填料浆配比要求进行模糊控制, 但除充填水均质及稳定外, 其余的充填材料如胶凝材料、尾砂等受原材料物化特性的影响, 在实际生产过程中存在明显的来料变化波动大, 给料过程不均匀, 计量设备瞬时变化大等问题,

所有开环控制的给料系统只能按照充填料浆配比要求达到粗略控制的程度, 最终将导致充填料浆的输送浓度不能保持恒定或者波动较大; 同时闭环控制, 在搅拌设备底部管道加装浓度计、流量计, 主要对充填料浆管道处浓度与搅拌液位实时监测, 对比与设计值差别, 反馈给料浆进料阶段(计量设备等)或底部管道阀门的 PLC 系统, 实时调整料浆配比(材料用量或用水量)或调整底部管道阀门开合度。在开环系统受到上述情况影响后, 各充填材料存在波动且已影响到充填料浆输送浓度, 导致其偏离值较大时, 此时就需要闭环控制的反馈调节系统来配合开环给料系统(粗控系统)进行精确控制<sup>[3-4]</sup>。

本文分析并总结已有充填料浆制备调控工艺面临的问题, 聚焦充填料浆制备过程的反馈调控, 寻求在工艺上缩短充填料浆浓度不稳定的响应时间, 将调控措施提前, 为此提出了搅拌过程扭矩信号的充填料浆制备浓度稳定调控工艺, 并详细阐述其技术实现途径, 达到前馈调控目的, 实现充填料浆制备浓

[作者简介] 朱瑞军(1971—), 男, 正高级工程师, 主要从事矿山工程咨询设计与研究工作。

[基金项目] 国家重点研发计划“数据驱动的金属矿膏体充填智能化精准控制技术课题”(课题编号:2019YFC0605302)。

[引用格式] 朱瑞军, 李立涛, 夏长念, 等. 充填料浆制备浓度前馈调控工艺及技术途径[J]. 中国矿山工程, 2024, 53(1): 36-40.

度的稳定控制。

## 2 充填料浆制备过程简述

充填料浆制备系统属于一套参数多、滞后大、各变量之间互相耦合制约的工艺系统, 充填整体工艺需物料监测、控制设备、反馈仪表等全面协调, 并有完整的工艺控制计算方法配合实现。当开环的给料系统按料浆配比波动且导致输送浓度偏离较大时, 需启动闭环反馈调控系统开展充填料浆输送浓度的稳定调节与精确控制, 而搅拌出口管道安装的浓度计识别出充填料浆浓度不符合设计浓度时, 未满足输送浓度要求的料浆已进管道输送, 当进料过程做出响应时, 已明显存在滞后, 而由于固体物料的下料不均匀, 波动大, 虽累积物料给料量相对准确, 但瞬时给料不均匀, 故采取调整固体物料的方式, 会使该系统一直处于反馈调节过程中, 影响系统的高效及稳定运行。反馈有前后之别, 充填料浆输送浓度的稳定精确取决于反馈控制策略的时效性, 然而已有的基于搅拌设备底部管道处的料浆浓度数值反馈方法为后馈响应, 在制备过程非线性、慢时变、来料波动大、过渡时间长、滞后性等影响下, 严重降低了充填料浆输送浓度的稳定性。

从生产工艺角度来讲, 要使整个工艺稳定进行, 必须要搅拌出口流量在稳定的范围内, 流量不能突然波动时大时小, 否则不利于生产的稳定运行, 无法满足生产工艺方面的要求。然而对于出口浓度的大小控制来讲, 浓度大小的都是通过调节进料过程各材料的进料量来改变的, 如果出口料浆浓度大于原设定的浓度值时, 就会增加充填水的用量或者减小充填材料的用量, 若是针对搅拌槽液位升高问题, 增大料浆出口电动阀门的开合度, 但是这样肯定会造成流量的突然变大, 进而带来生产情况的不稳定; 反过来如果料浆浓度大于原设定的浓度值时就需要增加充填骨料的用量或者减小充填用水量, 减小料浆出口电动阀门的开合度, 又势必会引起底流流量的突然变小, 同样会造成的生产情况的不稳定, 不管哪种情况发生都会给后续工艺带来很多影响。因为若是能稳定充填料浆制备浓度, 出口流量可根据充填任务需求灵活调整, 关键问题还是在于充填料浆制备浓度的稳定性。

从控制角度来讲, 料浆从搅拌槽流入浓度计或者电动阀门需要一些时间来经过一段管路, 这样就会在有一部分浓度固定的料浆存留在管路之中, 这

样必定会出现在浓度调节过程中当料浆浓度值大于设定值时, 采取相应的调控措施, 但是由于进料阶段充填材料在传输过程中存在有滞后环节, 很难实时满足需要的料浆浓度值, 进而影响了控制效果。

从设备角度讲, 为了方便对出口的料浆进行流量和浓度的检测需要在输出矿浆的管道上安装流量计和浓度计。安装的流量计和浓度计在检测时必定存在一定的测量和非线性误差, 这样也会给充填料浆输出浓度的调控带来一定的影响。

因此, 充填料浆制备浓度的稳定性很大程度上取决于调控策略的先进性, 先进调控方式的重要特质应是监测识别的及时性, 调控过程的精准性。

## 3 基于搅拌过程的充填料浆浓度控制

### 3.1 充填料浆制备常见控制系统

在整个充填料浆制备控制系统中, 常见的方式如图1所示, 最重要的一个闭环系统为根据搅拌出口管道的充填料浆反馈调节系统, 该流程具备明显的响应时间长, 调控措施滞后等明显缺点, 当底部浓度计实测充填料浆浓度与设计浓度存在差别时, 系统做出响应, 反馈至进料阶段, 通过采取增加或减小材料使用量, 而此时不符合设计要求浓度的充填料浆已由管道输送至井下, 这个时候采取的调控措施没有任何现实意义, 反而会引起整个制备系统的大震荡。

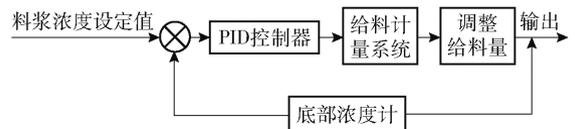


图1 基于搅拌出口的充填浓度反馈调节流程

图2所示为充填料浆制备过程的自控系统的示意图, 如前述, 本文提出的基于搅拌过程的充填料浆浓度控制工艺核心点在于利用“解决方案”替代“闭环控制”, 即采用基于搅拌阶段的充填料浆浓度反馈调控代替基于搅拌出口的管道充填料浆浓度反馈调控, 目的是将充填料浆浓度的识别向上迁移, 进而有效缩短响应时间, 从根本上解决调控措施的滞后性缺点, 改善充填料浆浓度反馈调控效果, 尽可能的保证充填料浆在搅拌出口阶段管道浓度的稳定性。

### 3.2 搅拌过程扭矩信号调控原理

在线监控是实时监测新拌充填料浆工作性能的有效方式, 从混凝土的制备经验来看, 对于新拌充填

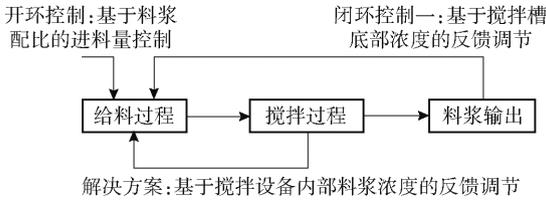


图2 充填料浆制备过程的自控系统

料浆性能的在线监测与调控最好的模式是基于料浆流变特性的质量控制技术。充填料浆制备阶段的搅拌设备是通过搅拌轴驱动叶片来制备充填料浆,这就为通过搅拌过程在线监测扭矩,从而在线监控拌合料浆的工作状态,在线分析搅拌阶段料浆是否拌好,进而对新拌充填料浆的输出实现智能化精准控制提供了可能。

由于搅拌设备的扰动,直接获取充填料浆在设备中的浓度较为困难,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,进行进料口的实时调节,以期满足充填料浆制备阶段下料口的稳定输出。充填料浆浓度若在空间上处处相等,也就说明料浆质量均匀,其管输等性能也达到最优,那么调控充填料浆浓度就是调控其力学性能,基于流变学理论可知,充填料浆浓度与屈服应力存在正相关性,其反应在搅拌装备上,就是扭矩变化象征屈服应力的变化,同时代表料浆浓度的变化,因此,可通过采集搅拌扭矩进而识别搅拌设备内部充填料浆的浓度<sup>[5]</sup>。

搅拌扭矩与料浆浓度关系如图3所示。

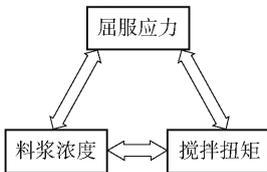


图3 搅拌扭矩与料浆浓度关系

控制系统在扰动下的动态过程如图4所示,系统输出响应第一次到达希望值得时间 $t_r$ 称为上升时间,它从另一个角度来衡量系统响应得快慢程度, $t_r$ 越小响应越快,因此通过缩短 $t_r$ 来实现缩短浓度不稳定时的响应时间<sup>[6]</sup>。

#### 4 搅拌过程前馈调控技术途径

为了实现基于搅拌过程扭矩信号的充填料浆浓度调控系统,详细阐述搅拌过程调控的几个关键技术实现途径。

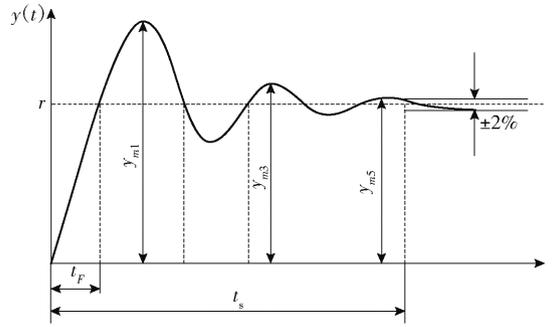


图4 控制系统在扰动下的动态过程图

#### 4.1 充填料浆浓度表征技术

充填料浆在制备阶段进行搅拌时,演化过程如图5所示,扭矩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。

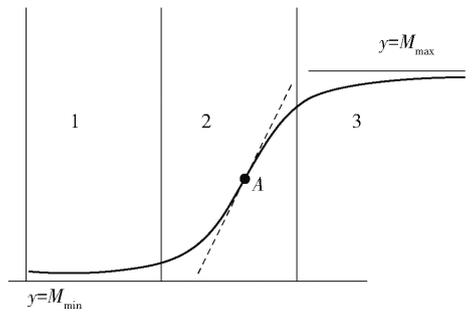


图5 扭矩信号随充填料浆浓度演化过程

当料浆浓度偏小或偏大时,扭矩信号分别趋近于某极小值 $M_{min}$ 和某极大值 $M_{max}$ 。料浆在浓度达到饱和状态时搅拌信号增长放缓,并趋近于某极大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信号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,由函数图像可知,搅拌信号趋近于一个极小值,因为低浓度时固体成分间距较大,相互作用较弱,对搅拌信号的增长有限。因此,揭示充填料浆在搅拌过程中搅拌信号与浓度的关系模型为

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

式中: $y$ 为制备阶段充填料浆扭矩信号; $x$ 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,设备类型相关参数,具体数值根据实际情况获得。

如图5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, 然而经研究发现, 此值普遍大于实际的临界浓度, 故获得该函数参数  $c$  值与实际临界浓度存在修正关系, 可通过室内试验实现。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。故该基于扭矩信号的充填料浆浓度表征模型具有可实施性。

### 4.2 扭矩信号滤波降噪技术

搅拌装备上的信号传感器受外界因素影响会产生较大波动范围, 使采集信号难以被观测或基于此计算充填料浆浓度存在难度, 需对采集到的信号进行滤波处理, 减少信号波动范围, 使其平滑稳定, 为保证信号稳定可靠, 采用滑窗均值卡尔曼算法进行滤波处理<sup>[7-8]</sup>。

滤波与计算程序框架如图 6 所示, 由于系统需要长时间运行, 采用全局滤波会得到较好的滤波效果, 但是会造成数据处理时间不断加长、内存不断加大的问题; 采用局部滤波虽然不会增加数据处理时间和占用系统内存, 但是数据处理效果较差, 实时性较低; 采用滑窗处理方式则会兼顾数据处理实时性和处理效果, 需要不断传递滤波优化中的动态参数。滑窗处理过程包括定义滑窗窗口尺寸, 存入待处理数据和动态参数, 滤波处理, 更新动态参数, 剔除最旧的一条数据五个部分。程序运行时, 由于不断更新滤波算法中的动态参数, 带入了早期数据对新数

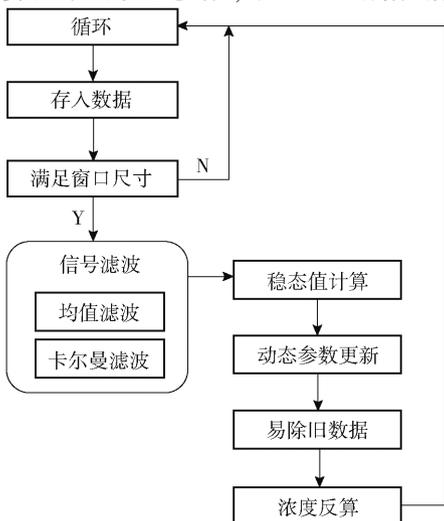


图6 信号滤波与浓度反算方法及过程

据的影响, 达到了全局优化的效果。

在每一次滤波结束后, 会利用滤波后的数据进行反算处理和稳态值计算。反算处理利用式(1)进行运算, 稳态值计算则直接对窗口中的数据进行一次函数拟合, 计算函数斜率, 当函数斜率在设定的阈值范围内时, 则认为达到了稳定状态, 此时窗口内数据的均值则为稳态值。

### 4.3 调控水量计算方式

在实际生产中, 来料性质不稳定、瞬时给料量波动大, 是客观存在的现象, 即使  $t$  时刻各物料累计量给料准确, 由于受到各物料干湿以及均匀程度的影响, 很难保证各物料瞬时给料量的稳定, 因此会引起充填料浆瞬时浓度的偏差, 当瞬时浓度偏离设计浓度一定范围时, 这个时候为了控制充填料浆浓度, 需启动调控程序。若是采取调控固料量(固料量的瞬时给料不稳定)来实现调控充填料浆瞬时浓度势必存在较大误差, 无法满足精准调控充填料浆浓度的目的, 同时胶砂比在设计充填料浆配比时已基本确定, 是保证充填料浆力学性能的必要条件, 结合充填制备工艺来看, 充填水是一种均匀介质, 给料环节相对较简单且稳定, 采取加减水的方式调控浓度具有操作便捷, 调控精准并且可实施性较强的优势。如图 7 所示, 以立式搅拌为例, 简述调控水量的计算过程。

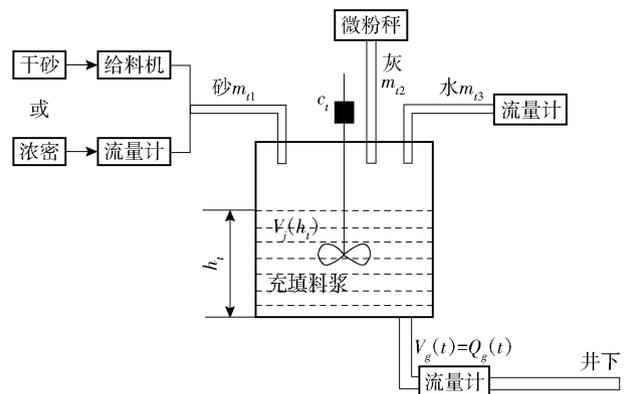


图7 充填料浆搅拌过程示意图

若是实时监测到的浓度  $c_t$  偏离设计浓度  $c_d$  一定范围, 影响充填料浆浓度的稳定输出, 采用加减充填水的方式实施充填料浆浓度的调控, 因此加减水量的实时精确计算至关重要。在工业控制中, 设定瞬时浓度的偏离范围, 当达到偏离条件时, 设计浓度和瞬时浓度存在以下关系。

$$1 - c_d = \frac{m_{js} + \Delta m_{ts}}{m_{jl} + \Delta m_{ts}}$$

$$m_{tsj} = (1 - c_t) \cdot m_{ij}$$

联立二式可得调控水量:  $\Delta m_{ts} = \frac{c_t - c_d}{c_d} \cdot m_{ij}$

因此,确定调控水的瞬时量,需确定  $t$  时刻搅拌桶内的充填料浆质量  $m_{ij}$ 。

对于工业进料系统,虽不能保证瞬时进料量的稳定(和物料的性质密切相关),但  $t$  时间段内累计进料量的误差较小,默认一段时间内各物料累计进料量满足充填料浆配比设计要求,由质量守恒定律可知,

$$m_{tz} = m_{ij} + m_{ig}$$

又有:

$$\begin{aligned} m_{tz} &= m_{t1} + m_{t2} + m_{t3} \\ m_{ig} &= \rho \cdot V(t) = \rho \cdot Q(t) \\ \rho &= \frac{m_{tz}}{V_{tz}} = \frac{m_{t1} + m_{t2} + m_{t3}}{V_j(h) + V_g(t)} \end{aligned}$$

可知:

$$m_{ij} = \rho \cdot V_j(h)$$

最终获得:

$$\Delta m_{ts} = \frac{c_t - c_d}{c_d} \cdot \frac{m_{t1} + m_{t2} + m_{t3}}{V_j(h_t) + V_g(t)} \cdot V_j(h_t)$$

式中,  $c_d$  为充填料浆需求浓度,即设计浓度,%;  $c_t$  为  $t$  时刻充填料浆瞬时浓度,即搅拌设备内实时浓度,%;  $m_{tz}$  为  $t$  时刻累计的充填料浆质量,kg;  $m_{ij}$  为  $t$  时刻搅拌桶内充填料浆质量,kg;  $m_{ig}$  为  $t$  时刻经过管道累计的充填料浆质量,kg;  $\Delta m_{ts}$  为调控浓度所需加减水量,kg;  $m_{tsj}$  为  $t$  时刻搅拌桶内充填料浆的含水量,kg;  $m_{t1}$  为  $t$  时刻累计的充填尾砂质量,kg;  $m_{t2}$  为  $t$  时刻累计的充填水泥质量,kg;  $m_{t3}$  为  $t$  时刻累计的充填水质量,kg;  $\rho$  为充填料浆密度,kg/m<sup>3</sup>;  $V_j(h_t)$  为  $t$  时刻搅拌桶内充填料浆体积,m<sup>3</sup>;  $V_g(t)$  为  $t$  时刻经过管道累计充填料浆体积,m<sup>3</sup>。

#### 4.4 调控的自动化实现流程

按照充填料浆制备工艺流程的要求编好其他设备及仪表阀门上下位机逻辑控制程序 PLC,通过扭矩信号的反馈,依据保证充填体性能,控制充填成本的原则,启动相应的充填水 PID 控制回路,根据实时计算的加减水量进行调控,实现稳定充填料浆制备浓度的目的<sup>[9]</sup>,调控过程如图 8 所示。

## 5 结论

基于搅拌扭矩信号的充填料浆制备浓度前馈调

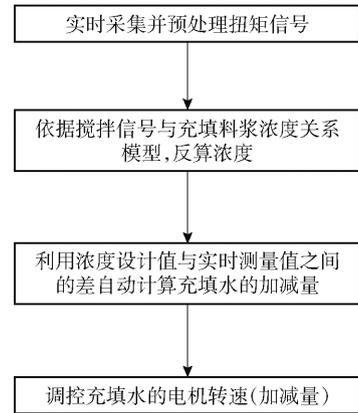


图 8 基于搅拌信号的充填水调控过程

控工艺,前提是通过室内试验等方式确定充填料浆质量浓度的表征模型,即模型的具体形式,在开展工业应用时结合扭矩信号的滤波降噪,利用模型实时计算搅拌装备内充填料浆质量浓度,识别其与设计浓度的差值,确定调控水量,基于 PID 采取调控措施,最后实现稳定充填料浆制备浓度的目的,具有可行性,但仍需开展进一步的工业应用工作,以便优化改进该调控工艺。

#### [参考文献]

- [1] 于润沧. 金属矿山胶结充填理论与工程实践[M]. 北京: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] 姜寄,肖黑,李书生,等. 基于工业 Ethernet 的矿山膏体充填控制系统的开发[J]. 中国矿业, 2017, 26(S2):301-306.
- [4] 赵占斌,王国立. 自动化控制在金诚信尾矿膏体处置技术工程实验室的应用[J]. 中国矿山工程, 2019, 48(2):72-74.
- [5] 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.
- [6] 韩璞. 现代工程控制论[M]. 北京:中国电力出版社, 2017.
- [7] 顾亚文. 基于卡尔曼滤波的电子数据异常检测系统[J]. 自动化技术与应用, 2023, 42(12):95-98.
- [8] 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.
- [9] 闫方宝,王尚祯. 新型尾砂固结剂在矿山的应用[J]. 有色冶金节能, 2014, 30(2):46-49.