

充填搅拌放料系统料位控制及稳态放料参数优化研究*

刘伟^{1,2}, 任高峰³, 江科^{1,2}, 盛佳^{1,2}, 朱豪^{1,2}, 张聪瑞³, 刘奇^{1,2}, 谭星宇^{1,2,3}

- 1.长沙矿山研究院有限责任公司, 湖南长沙 410012;
- 2.金属矿山安全技术国家重点实验室, 湖南长沙 410012;
- 3.武汉理工大学资源与环境工程学院, 湖北武汉 430070)

摘要: 充填搅拌设备料位控制是实现料浆均质化的关键, 频繁的料位和流量波动对料浆质量及输送管网造成较大影响, 最终导致充填质量下降和成本增高。为解决某矿山充填料位和放料流量难以控制的问题, 通过构建理论计算模型, 提出搅拌放料系统的压头损失计算公式, 得到放料管管径 D 与出料口流速 v 成反比, 屈服剪切应力与容重比值 τ_0/γ 、黏性系数 η 与容重 γ 比值 (η/γ) 跟搅拌桶料位 H_j 成正比。充填材料试验结果表明, 随着料浆质量浓度 C_w 的增大, τ_0/γ 、 η/γ 同样增大, 有利于搅拌桶内料位的提升。以料浆质量浓度分别为 74%、72%、70%、68% 及放料管管径为 140 mm、125 mm 为变量, 计算分析得出在 $C_w=74\%$ 、 $D=140$ mm 和 $C_w=72\%$ 、 $D=125$ mm 两种工况下, 搅拌桶料位分别为 1.59 m、1.65 m, 处于搅拌桶最佳运行料位范围。为进一步验证公式的合理性, 以 Space Claim 软件构建搅拌放料系统模型, 基于 Fluent 进行数值模拟分析, 结果显示, 放料管单位长度沿程压头损失及料浆出口流速模拟结果与理论计算值相对误差均在 10% 以内, 研究表明所提出的搅拌放料系统的压头损失计算公式在优化料位控制和稳态放料方面具有良好的指导意义。

关键词: 搅拌桶料位; 充填料浆; 料浆质量浓度; 稳态放料; 放料管道; 数值模拟

中图分类号: TD853.34 **文献标识码:** A

文章编号: 1005-2763(2024)06-0142-07

0 引言

充填站一般由尾砂浓缩系统、水泥或胶结剂储存给料系统、充填料浆制备系统及输送系统组成, 是介于选矿与采矿之间的咽喉部位, 其复杂的工艺流程节点之间的顺畅配合与核心参数的互联反馈调节控制是实现矿山高质量充填的重要前提^[1]。近年

来, 随着自动化、智能化技术的高速发展, 充填工艺参数调节机制愈发完善, 搅拌设备物料如尾砂浆、水泥、调浓水等, 可借助电控管夹阀、电机变频器、流量计、浓度计、液位计等实现精细化控制, 以保证各物料量满足制备系统设计所需^[2]。然而, 目前在搅拌设备放料及料浆的井下管网输送方面的控制较少^[3-4], 在实际应用中, 流量的频繁变化加剧了管道的磨损。大量学者对矿山充填管网控制展开了研究。甘德清、郭沫川、毛明发、康志强等^[5-8]对管输压力损失进行理论计算和数值模拟研究, 得到的相关结论可指导矿山井下管网的优化设计; 陈秋松、张修香等^[9-10]对管道输送进行数值模拟分析, 并通过室内试验或工业试验验证所提出模型的可靠性; 王海瑞等^[11]通过流体力学理论公式及管阻经验公式计算, 指导充填泵选型。针对搅拌设备放料量与料位控制相关的研究方面, 陈之功^[12]对尾砂充填自动控制系统整体功能进行描述, 选用雷达料位计或超声料位计检测, 通过放砂管路上电动放砂阀调节进料量来控制料位; 姬晓利等^[13]基于模糊 PD 控制器, 从自动控制设计角度研究泵送量与配比量之间的物料平衡; 陈鑫政等^[14]从智能充填整体架构出发, 运用料位监控和报警手段, 通过 PID 控制膏体工业泵的排量来调节搅拌机料位。上述相关研究仅针对充填系统自动控制进行定性的描述, 或通过控制泵送系统输送量来控制料位, 缺少对搅拌设备料位控制机理及放料管道参数的优化研究。搅拌设备出料量一般由电控管夹阀的开度调节控制, 其放料管道设计未能达到稳态放料的功能, 且电控管夹阀与充填料浆中的水泥长期接触后, 使用精度和效果会降低,

* 收稿日期: 2023-11-29

基金项目: 国家重点研发计划课题(2022YFC2904002, 2022YFC2904003)。

作者简介: 刘伟(1988—), 男, 湖北十堰人, 硕士, 工程师, 主要从事矿山充填系统装备技术研究与设计方面的研究工作, E-mail: summkey@163.com。

通信作者: 任高峰(1979—), 男, 湖北武汉人, 博士, 教授, 主要从事矿山开采与安全方面的研究工作, E-mail: rgfwhut@163.com。

电控阀门调节的时滞性及搅拌桶料位的频繁波动亦是放料系统时刻处于调整状态的主要原因。为降低充填搅拌设备放料系统的工艺复杂性,实现放料流量和搅拌料位的良好控制,本研究结合某矿山充填现状,通过构建理论计算模型,提出搅拌放料系统的压头损失计算公式,同时结合充填材料试验,分析各参数之间的关系,然后对搅拌放料系统进行数值模拟分析,研究可为充填搅拌放料系统料位控制及稳态放料优化提供借鉴。

1 矿山充填概况

某矿山设计为空场嗣后充填采矿法,主副井联合开拓,两翼对角式通风,充填材料选用矿山浮选全粒级尾砂,采用全尾砂胶结充填工艺(见图1)。充填站制备及输送能力为 $80\text{ m}^3/\text{h}$,选矿厂尾砂通过渣浆泵泵送至尾砂浓密设备,经脱水浓密后形成的底流通过放砂管道、流量计、浓度计、电控管夹阀等定量给料至搅拌设备;水泥外运至水泥仓储存,需胶结充填时,由给料计量装置定量给料至搅拌设备,如需调节料浆质量浓度则可根据实际情况定量添加调浓水;搅拌设备采用单段立式搅拌桶,物料经高速搅拌后形成均质体,由搅拌桶桶底开孔的放料管自流至钻孔下料缓存槽中,再经钻孔和井下管网输送至采场完成充填。

搅拌桶腔体内径为 2 m ,高度为 1.95 m ,居中的搅拌轴上布置有两层叶片,第一层叶片离底部高度为 0.85 m ,第二层叶片离底部高度为 1.35 m 。搅拌桶设计最佳运行料位为 $1.45\sim 1.65\text{ m}$,混合物漫过第二层叶片,并且上述料位可使物料在搅拌桶内停留约 $3.4\sim 3.9\text{ min}$ 时,能充分保证搅拌效果。实际生产中,搅拌桶底部按 150 mm 开孔,并经由规格为 $\Phi 150\text{ mm}\times 6\text{ mm}$ 的直管及两个 90° 弯头连接搅拌桶和钻孔下料缓冲槽,管道材质为无缝钢管。

矿山充填料浆质量浓度为 $68\%\sim 74\%$,搅拌桶料位及放料流量波动较大,经常出现料位过低现象,影响了充填系统运行的稳定性和料浆制备质量,进而导致充填质量无法满足采矿设计要求,使充填成本居高不下。同时,搅拌桶放料量频繁波动,致使充填钻孔及井下管网的输送呈现过度磨损的现象。为解决上述问题,有必要进行搅拌桶放料流量和搅拌料位控制相关的研究,保证充填料浆质量满足要求及料浆输送系统的顺畅运行。

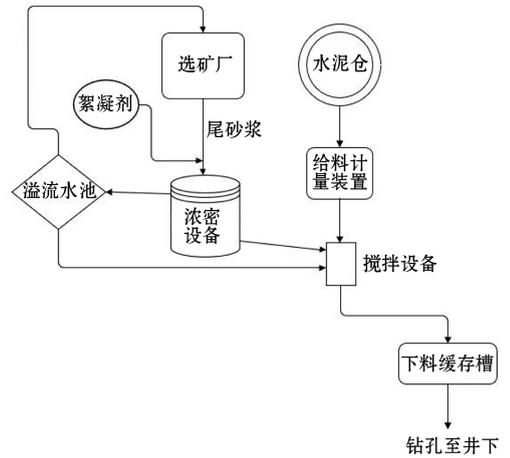


图1 全尾砂充填工艺流程

Fig.1 Full tailings filling process

2 模型构建及理论计算

搅拌桶、放料管、下料缓存槽及钻孔的布置如图2所示,假设搅拌桶双层叶片的能量全部作用于搅拌桶内部料浆的混合,无多余能量用于促进或阻止料浆在放料管内的输送,且料浆为不可压缩的宾汉流体。依据能量守恒定律,料浆液位所具有的势能转换成管道沿程阻力损失、局部阻力损失、出口料浆动能及出口料浆势能,满足伯努利方程,见式(1)。

$$\frac{v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\gamma} + z_1 - h_L = \frac{v_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\gamma} + z_2 \quad (1)$$

式中, v_1 、 v_2 分别为搅拌桶料浆液面处、放料管道出口处平均流速, m/s ; p_1 、 p_2 分别为搅拌桶料浆液面处、放料管道出口处压强, Pa ; γ 为料浆容重, N/m^3 ; g 为重力加速度, m/s^2 ; z_1 、 z_2 分别为搅拌桶料浆液面处、放料管道出口处相对于基准面的高度, m ; h_L 为压头损失, m 。其中, $v_1=0\text{ m/s}$;搅拌桶料浆液面处、放料管道出口处均与大气相通,即 p_1 、 p_2 为大气压;搅拌桶底部与放料管出口高差为 0.6 m ; h_L 包括沿程阻力损失 h_f 、局部阻力损失 h_j 。

沿程阻力损失 h_f 计算见式(2):

$$h_f = \frac{32\eta v L}{\gamma D^2} + \frac{4\tau_0 L}{\gamma D} \quad (2)$$

式中, τ_0 为屈服剪切应力,与壁面摩擦损失压头相关; η 为黏性系数,与沿程水头损失有关,可由圆管层流的达西公式表示; v 为出料口流速, m/s ; D 、 L 分别为放料管管径和管线长度,可分为两段考虑:第一段为搅拌桶内, D 为 2000 mm , L 为料位高度,第二段为放料管内, D 为 140 mm , L 为管道总长(含弯管) $10\ 200\text{ mm}$ 。

本模型局部阻力损失包括两个 90° 弯头处的损失和搅拌桶至放料管管径的突然收缩导致的损失。弯头损失 h_b 计算见式(3), 收缩损失 h_c 计算见式(4)。

$$h_b = k_b \frac{v^2}{2g} \quad (3)$$

$$h_c = k_c \frac{v^2}{2g} \quad (4)$$

式中, k_b 为 90° 弯管损失系数, 与管内壁绝对粗糙度、弯管半径相关, 取值为 0.18; k_c 为突然收缩的损失系数, 与前后通道直径比值相关, 取值为 0.46。考虑到本模型中放料管为满管流, 流体不可压缩, 因而式(3)与(4)中的流速 v 均与放料管出口流速相同。

根据上述分析及式(2)至式(4), 本模型压头损失 h_L 计算见式(5)。

$$h_L = h_f + h_b + h_c = \frac{32\eta v L}{\gamma D^2} + \frac{4\tau_0 L}{\gamma D} + 2k_b \frac{v^2}{2g} + k_c \frac{v^2}{2g} \quad (5)$$

将上述数据、公式代入式(1), 可得搅拌桶料位高度 H_j 见式(6)。放料管管径 D 越小, 在一定的放料流量下, 出料口流速 v 越大, 搅拌桶料位 H_j 越大, 符合实际生产经验; τ_0/γ 、 η/γ 值越大, 搅拌桶料位 H_j 越大。

$$H_j = \frac{\gamma}{\gamma - 8\eta v - 2\tau_0} \left(\frac{326.4\eta v}{\gamma D^2} + \frac{40.8\tau_0}{\gamma D} + \frac{1.82v^2}{2g} - 0.6 \right) \quad (6)$$

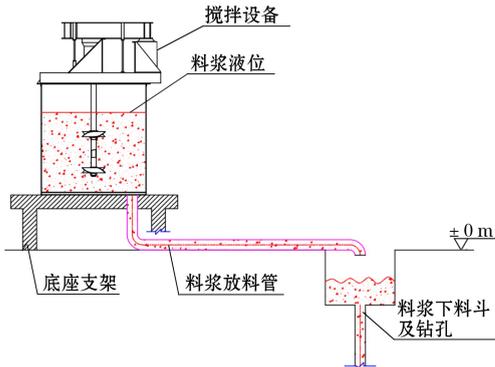


图2 搅拌及放料系统

Fig.2 Mixing and discharging system

3 充填材料流动性能试验

3.1 粒度及坍落度测试

选取矿山具有代表性的全粒级尾砂及矿用水泥, 由 Mastersizer 3000 型激光衍射粒度分析仪进行测试, 测试结果见表 1。结果表明, 尾砂平均粒径为 $65.48 \mu\text{m}$, $75 \mu\text{m}$ 以下颗粒占 63.59%, 属于中等粒径尾砂, 粒级组成与同类矿山相似。矿用水泥平

均粒径为 $28.71 \mu\text{m}$, 最大粒径约为 $100 \mu\text{m}$, 符合国标号水泥的粒度要求。尾砂 $20 \mu\text{m}$ 以下的极细颗粒含量为 29.80%, 再加上水泥细颗粒的掺入, 充填物料的极细颗粒将填充在粗颗粒尾砂之间, 提高料浆的和易性及保水性, 使料浆具有良好的输送性态。

对灰砂比为 1:10 的充填物料进行坍落度试验, 试验方法依据《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》(GB/T 50080—2016), 结果如图 3 所示。根据不同质量浓度时料浆的坍落度数据及试验过程中的和易性、保水性, 可以判断料浆质量浓度为 68%~74% 时充填料浆呈现结构流的状态。

表 1 全尾砂、矿用水泥粒度测试

Table 1 Particle size test of full tailings and mining cement

粒径/ μm	累计含量/%	
	全尾砂	水泥
-5	11.62	17.11
-10	19.98	29.38
-20	29.80	47.08
-50	52.38	80.82
-75	63.59	94.17
-100	77.40	100
-200	94.75	—
-400	100	—

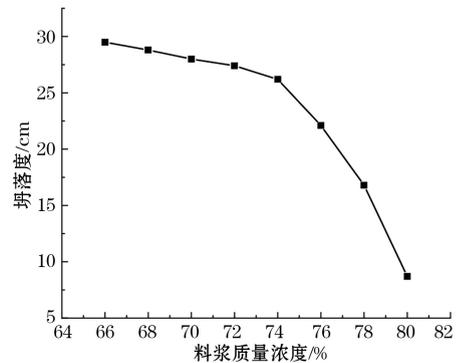


图3 充填物料坍落度试验结果

Fig.3 Slump result of filling slurry with different mass concentrations

3.2 充填料浆流变参数测定

在坍落度的基础上进一步验证相同条件下充填料浆的流变参数的变化对评估料浆的输送性能具有十分重要的意义。根据充填物料粒度及坍落度测试结果, 矿山充填物料浆在料浆质量浓度为 68%~72% 时呈结构流料浆体, 采用 RST-SST 流变仪测试其流变参数, 结果见表 2。由表 2 可知, 料浆质量浓度越高, 其容重 γ 、屈服剪切应力 τ_0 、黏性系数 η 均呈增大趋势, 且屈服剪切应力与容重比值 τ_0/γ 及

黏性系数与容重比值 η/γ 同样呈现增大趋势,料浆质量浓度的提高使输送阻力增大。结合式(6)可知,质量浓度的增加使料浆在管道内输送的沿程阻力变大,维持输送的搅拌桶料位随之升高,以形成料浆输送的平衡状态。

表2 不同质量浓度下充填料浆的流变参数测定

Table 2 Determination of rheological parameters of filling slurry with different mass concentrations

料浆质量浓度/ %	容重 γ / (N/m^3)	屈服剪切应力 τ_0 / Pa	黏性系数 η / ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)	τ_0/γ	η/γ
74	19 325.6	19.986	1.358	0.001 03	0.000 070
72	18 835.6	9.885	0.882	0.000 52	0.000 047
70	18 365.2	2.778	0.545	0.000 15	0.000 030
68	17 914.4	1.539	0.311	0.000 09	0.000 017

通过充填材料试验及式(6)分析可知,本文构建搅拌桶及放料管系统中(搅拌桶进料量保持恒定,与设计制备量相同),在特定的管径及放料流量条件下,必然存在一个确定的搅拌桶料位,使系统处于料浆输送的动态平衡之中,当实时料位高于特定料位时,多余的压头将使放料管内料浆流速变大,放料流量增大,料位随之下降,最终趋近于特定料位;当实时料位低于特定料位时,压头不足以维持放料管内料浆流速,放料流量减小,料位随之上升,最终趋近于特定料位。

4 搅拌放料系统数值模拟研究

为验证式(6)及上述分析的合理性,本文通过 Ansys 的前处理软件 Space Claim 建立搅拌放料模型,再通过 Fluent 软件模拟特定工况,通过设定进料量、搅拌桶料位、放料管管径,得到放料管单位长度压头损失、出口截面平均流速,与理论值进行对比分析。

4.1 理论计算求解

矿山搅拌桶料位和放料流量波动较大,时常处于料位过低状态,影响料浆制备质量,且流量波动会加速井下管网磨损。根据式(6),质量浓度 C_w (决定容重 γ 、屈服剪切应力 τ_0 、黏性系数 η)、放料管管径 D 、流速 v 是影响搅拌桶料位的关键参数,为指导现场实际生产,设定进料流量、放料流量均为充填系统输送能力 $80 \text{ m}^3/\text{h}$,放料管管径 D 为 125 mm、140 mm 两种情况,料浆质量浓度为 68%、70%、72%、74%。理论计算可得各参数见表 3。根据数据可知,只有在 $C_w=74\%$ 、 $D=140 \text{ mm}$ 和 $C_w=72\%$ 、 $D=125 \text{ mm}$ 两种工况下, H_j 分别为 1.59 m、1.65 m,处于搅拌桶最佳运行料位范围,其余工况下搅拌桶料

位均处于过高或过低状态,无法满足生产需要。

表3 理论计算结果

Table 3 Theoretical calculation results

料浆质量浓度/ %	容重/ (N/m^3)	屈服剪切应力/ Pa	黏性系数/ ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)	管径/ mm	出口流速/ (m/s)	料位高度/ m
74	19 325.6	19.986	1.358	140	1.444	1.59
				125	1.812	2.71
72	18 835.6	9.885	0.882	140	1.444	0.87
				125	1.812	1.65
70	18 365.2	2.778	0.545	140	1.444	0.35
				125	1.812	0.88
68	17 914.4	1.539	0.311	140	1.444	0.04
				125	1.812	0.39

4.2 数值模型

对模型作如下假设:充填浆体在管道中的流动是不可压缩流体;充填浆体在管道中的流动为定常流动;充填浆体在管道中均匀且性质稳定。

充填料浆的黏度通常在 $0.5 \sim 1.5 \text{ Pa} \cdot \text{s}$,输送管道范围一般为 $125 \sim 200 \text{ mm}$,料浆流速范围通常为 $0.8 \sim 2 \text{ m}/\text{s}$,其在管道中流动的雷诺数小于 1440,处于层流状态,因此在 Fluent 模拟中选用层流模型。充填料浆为宾汉流体,在模拟中选择 Herschel-Bulkley 流变模型,该模型可以描述带有屈服应力的剪切变稀或者增稠的流体,考虑了宾汉流体和幂率流变的特性行为。

在 Ansys 前处理软件 Space Claim 中建立搅拌放料系统模型如图 4 所示,搅拌罐直径为 2.0 m;管道设置两种管径,分别为 125 mm 和 140 mm;搅拌桶底部至管道垂直高差为 600 mm;弯头半径为 300 mm,弯头倍数为 2;放料管总长度为 10.2 m(含弯管);搅拌桶料位高度按表 3 取值。

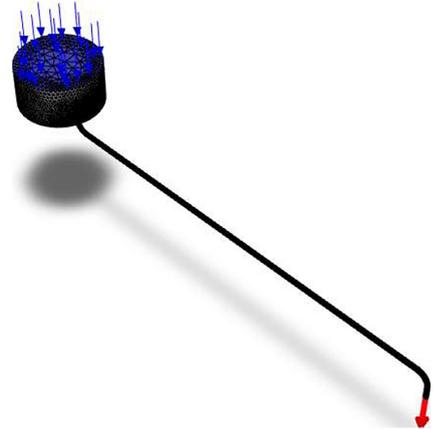


图4 搅拌放料模型

Fig.4 Mixing and discharging model

环境设置和边界条件设置为:重力加速度 $g = 9.8 \text{ m/s}^2$;多相流模型选择 VOF(流体体积函数模型);搅拌桶顶部为压力入口;放料管出口为压力出口。

4.3 数值模拟结果与分析

4.3.1 压力分析

图 5 为不同参数条件下模型压力分布云图。由图 5 可以看出,料浆在搅拌放料系统中压力分布规律相似,随着搅拌桶中料浆深度变大,压力值逐渐增大,在放料管第一个弯头外侧区域,过弯后压力达到最大值,随着料浆在放料管中受到沿程阻力的影响,压力值又逐渐变小;在第二个弯头处因料浆垂直向下运动产生一定的虹吸效应,弯头外侧区域易形成负压;料浆继续运动至放料管出口处,压力值恢复至

与搅拌桶料位最高处相同(均与大气相通)。

4.3.2 速度分析

如图 6 所示,以 $C_w=72\%$ 、 $D=125 \text{ mm}$ 条件下模型流速分布云图、放料管出口断面流速分布图作典型性分析。由图 6 可知,由于重力作用,料浆在搅拌桶内至放料管方向速度不断增大,在第一个弯头处达到最大值,速度梯度存在于放料管直管断面,竖向直管断面最大流速值在管道中心处,速度梯度近似抛物线,而水平直管因重力作用,其断面流速梯度向管壁下侧偏移,水平直管断面最大流速值在管道中心以下;弯管段处料浆沿管道断面也存在明显的速度梯度,但与直管段不同,流速是沿弯管外侧向内侧逐步减小;出口处流速变慢,断面平均流速为 1.761 m/s 。

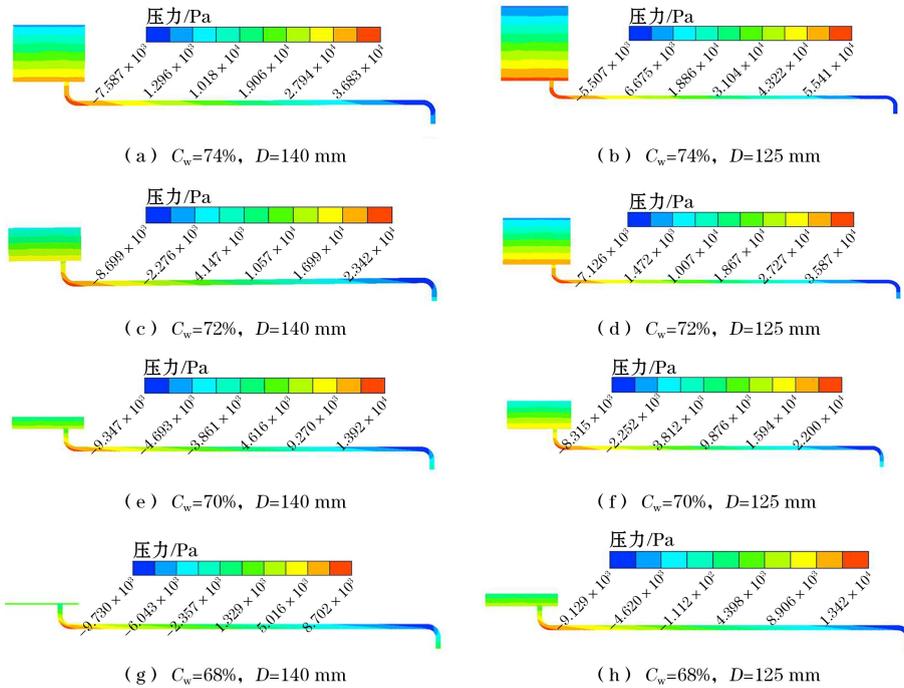
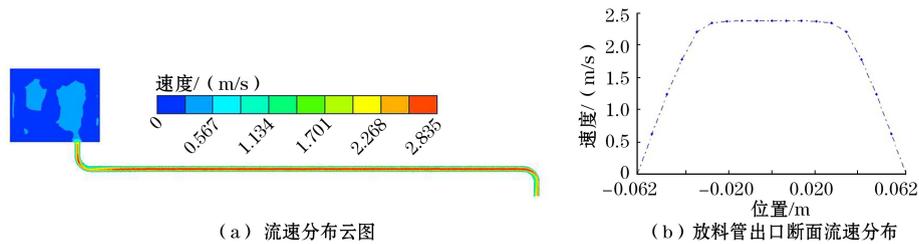


图 5 压力分布云图

Fig.5 Pressure distribution cloud map



(a) 流速分布云图

(b) 放料管出口断面流速分布

图 6 $C_w=74\%$ 、 $D=140 \text{ mm}$ 条件下流速分布

Fig.6 Flow velocity distribution under the condition of $C_w=74\%$ and $D=140 \text{ mm}$

4.3.3 模拟结果与理论结果误差分析

根据模拟结果,得到不同料浆质量浓度、放料管

管径条件下放料管单位长度压头损失与放料管出口流速,并将参数代入式(2)得到相应的理论值,将

模拟值及理论计算值比较,见表4。放料管单位长度压头损失模拟结果与理论计算值相对误差在10%以内,放料管料浆出口流速模拟结果与理论计算值相对误差在5%以内,表明所提出的搅拌放料系统的压头损失计算公式和放料管出料口流速计算公式在优化料位控制和稳态放料方面具有良好的指导意义。

表4 模拟值与理论计算值比较分析

Table 4 Comparative analysis between simulated and theoretical calculated values

料浆质量浓度/%	管径/mm	单位长度压头损失			出料口流速		
		模拟值/m	理论计算值/m	相对误差/%	模拟值/(m/s)	理论计算值/(m/s)	相对误差/%
74	140	0.210	0.195	7.14	1.483	1.444	2.63
	125	0.299	0.294	1.67	1.753	1.812	3.37
72	140	0.131	0.125	4.58	1.459	1.444	1.03
	125	0.210	0.191	9.05	1.761	1.812	2.90
70	140	0.081	0.074	8.64	1.458	1.444	0.96
	125	0.127	0.115	9.45	1.769	1.812	2.43
68	140	0.046	0.043	6.52	1.509	1.444	4.31
	125	0.072	0.067	6.94	1.814	1.812	0.11

5 结论

(1) 通过理论分析得出了搅拌放料系统的压头损失计算公式,搅拌桶料位高度与料浆容重、屈服剪切应力、黏性系数、流速以及放料管管径等相关。由公式可知,放料管内径越小,在一定的放料流量下,出料口流速越大,搅拌桶料位越大。

(2) 通过充填材料试验得出料浆制备输送料浆质量浓度为68%~74%,能够形成适宜的结构流,极细颗粒尾砂及水泥颗粒使上述料浆质量浓度范围内的料浆具备良好的和易性及保水性;流变参数的测定结果说明随着料浆质量浓度的增大,料浆的容重、屈服剪切应力、黏性系数同样增大,料浆在管道内输送的沿程阻力变大,维持输送的搅拌桶料位随之升高,以形成料浆输送的平衡状态。

(3) 通过数值模拟得出搅拌桶中料浆深度与压力值成正比,在放料管第一个弯头外侧区域,过弯后压力达到最大值,其后受到沿程阻力的影响,压力值又逐渐变小,在第二个弯头处因料浆垂直向下运动产生一定的虹吸效应,弯头外侧区域易形成负压。放料管出口断面流速沿放料管方向速度不断增大,且所得出的模拟值与理论计算值相接近,相对误差在10%范围内。

(4) 本文构建的模型及理论计算公式对研究充

填搅拌放料系统料位控制及稳态放料具有一定的指导意义,但模型未考虑搅拌设备本身搅拌轴和叶片对料浆的影响,在今后的研究中应充分考虑该因素,以获得更准确的结论。

参考文献(References):

- [1] 王增加,齐兆军,寇云鹏,等.智慧充填系统赋能矿山新发展[J].矿业研究与开发,2022,42(1):156-161.
WANG Zengjia, QI Zhaojun, KOU Yunpeng, et al. Intelligent filling system enabling new development of Mine[J]. Mining Research and Development, 2022, 42(1): 156-161.
- [2] 齐冲冲,杨星雨,李桂臣,等.新一代人工智能在矿山充填中的应用综述与展望[J].煤炭学报,2021,46(2):688-700.
QI Chongchong, YANG Xingyu, LI Guichen, et al. Research status and perspectives of the application of artificial intelligence in mine backfilling[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(2): 688-700.
- [3] 江科,彭亮,康瑞海,等.底流浓度波动对胶结剂单耗的影响研究[J].矿业研究与开发,2020,40(3):155-160.
JIANG Ke, PENG Liang, KANG Ruihai, et al. Study on the influence of under flow concentration fluctuation on unit consumption of cementing agent[J]. Mining Research and Development, 2020, 40(3): 155-160.
- [4] 江科.充填管道输送局部倍线对料浆质量浓度及管道磨损的影响研究[J].矿业研究与开发,2023,43(3):65-69.
JIANG Ke. Influence of local filling gradient of filling pipeline transportation on slurry concentration and pipeline wear. [J]. Mining Research and Development, 2023, 43(3): 65-69.
- [5] 甘德清,薛娜,刘志义,等.全尾砂充填料浆管道阻力损失探究及优化[J].金属矿山,2019(7):32-40.
GAN Deqing, XUE Na, LIU Zhiyi, et al. Investigation and optimization of pipeline resistance loss of full tailings slurry [J]. Metal Mine, 2019(7): 32-40.
- [6] 郭沫川,谭玉叶,楚立申,等.某铁矿管道自流输送分析及管道磨损研究[J].矿冶工程,2022,42(5):39-43.
GUO Mochuan, TAN Yuye, CHU Lishen, et al. Analysis of gravity flow pipeline transportation and pipeline wear for an iron mine [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2022, 42(5): 39-43.
- [7] 毛明发,王炳文,朱家锐,等.充填料浆自流输送管道磨损机理研究[J].金属矿山,2018(4):178-184.
MAO Mingfa, WANG Bingwen, ZHU Jiarui, et al. Study on wear mechanism of gravity transportation pipeline for backfilling slurry[J]. Metal Mining, 2018(4): 178-184.
- [8] 康志强,辛东夫,邵陆航,等.L型充填管道料浆输送压力损失及优化研究[J].金属矿山,2020(9):33-40.
KANG Zhiqiang, XIN Dongfu, SHAO Luhang, et al. Study on pressure loss and optimization of l-shaped filling pipe slurry[J]. Metal Mines, 2020(9): 33-40.
- [9] 陈秋松,张钦礼,王新民,等.全尾砂似膏体管输水力坡度计算模型研究[J].中国矿业大学学报,2016,45(5):901-906.

- CHEN Qiusong, ZHANG Qinli, WANG Xinmin, et al. Pipeline hydraulic gradient model of paste-like unclassified tailings backfill slurry[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2016, 45(5): 901-906.
- [10] 张修香, 乔登攀. 粗骨料高浓度充填料浆的管道输送模拟及试验[J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(1): 258-266.
- ZHANG Xiuxiang, QIAO Dengpan. Simulation and experiment of pipeline transportation of high density filling slurry with coarse aggregates[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015, 25(1): 258-266.
- [11] 王海瑞, 李夕兵, 赵国彦. 低高程长距离充填输送管网参数及阻力研究[J]. 金属矿山, 2009(10): 77-80.
- WANG Hairui, LI Xibing, ZHAO Guoyan. Study on parameters and resistance of low-elevation long-distance backfilling pipeline network[J]. Metal Mines, 2009(10): 77-80.
- [12] 陈之功. 尾砂充填自动控制系统[J]. 金属矿山, 2012(10): 110-112.
- CHEN Zhigong. Automatic control system of tailings filling [J]. Metal Mine, 2012(10): 110-112.
- [13] 姬晓利, 李建申, 刘杰辉, 等. 基于模糊 PD 的膏体成品缓冲斗料位控制研究[J]. 煤炭与化工, 2017, 40(12): 104-107.
- JI Xiaoli, LI Jianshen, LIU Jiehui, et al. Research on material level control of buffer bucket for paste preparation based on fuzzy PD[J]. Coal and Chemical Industry, 2017, 40(12): 104-107.
- [14] 陈鑫政, 杨小聪, 郭利杰, 等. 矿山充填智能控制系统设计及工程应用[J]. 有色金属工程, 2022, 12(2): 114-120.
- CHEN Xinzhen, YANG Xiaocong, GUO Lijie, et al. Intelligent control system design on mine filling and engineering applications[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2022, 12(2): 114-120.

Research on Material Level Control and Steady State Material Discharging

Parameter Optimization of Mixing and Discharging Filling System

LIU Wei^{1,2}, REN Gaofeng³, JIANG Ke^{1,2}, SHENG Jia^{1,2},
ZHU Hao^{1,2}, ZHANG Congrui³, LIU Qi^{1,2}, TAN Xingyu^{1,2,3}

(1.Changsha Institute of Mining Research Co., Ltd, Changsha, Hunan 410012, China;

2.State Key Laboratory of Safety Technology of Metal Mine, Changsha, Hunan 410012, China;

3.School of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan, Hubei 430070, China)

Abstract: The material level control of filling mixing equipment is the key to achieve the homogenization of slurry. Frequent fluctuations in material level and flow rate have a significant impact on the quality of the slurry and the transmission pipeline network, ultimately leading to a decrease in filling quality and an increase in cost. In order to solve the problem of difficulty in controlling the filling material level and discharging flow rate in a mine, a theoretical calculation model was constructed, and a formula for calculating the head loss of the mixing and discharging system was proposed. It is found that the diameter of the discharge pipe D is inversely proportional to the flow velocity v at the discharge port, and the yield shear stress to bulk density ratio τ_0/γ , viscosity coefficient η to bulk density γ ratio (η/γ) are directly proportional to the material level H_j . The results of the filling material experiment indicate that as the slurry mass concentration C_w increases, τ_0/γ , η/γ also increase, which is beneficial for improving the material level in the mixing tank. Taking slurry mass concentrations of 74%, 72%, 70%, 68%, and discharge pipe diameters of 140, 125 mm as variables, the calculation and analysis show that under two working conditions of $C_w=74\%$, $D=140$ mm and $C_w=72\%$, $D=125$ mm, the material level in mixing tank is 1.59 m and 1.65 m, respectively, which is within the optimal operating material level range of the mixing tank.

Key words: Material level of mixing tank, Filling slurry, Slurry mass concentration, Steady-state discharge, Discharge pipe, Numerical simulation