

矿山固废充填材料及技术

膏体料浆管输过程中颗粒迁移行为研究

王辉¹ 段文权¹ 刘敬智¹ 马俊生¹ 郭其林¹ 国仕磊¹ 赵海平^{1,2} 郝成^{1,2}

(1. 北方矿业有限责任公司, 北京 100053;

2. 中关村科技园区西城园管理委员会, 博士后科研工作站, 北方矿业有限责任公司分站, 北京 100053)

[摘要] 本文通过分析颗粒受到的流场外部力和颗粒间作用力, 总结悬浮液体系管道输送时颗粒迁移行为的力学成因, 分析颗粒迁移行为的影响因素, 总结基于力学机理的不同粒径颗粒迁移模型。管道输送过程中颗粒受到的流场外部力包括重力、黏性力、浮力、Saffman升力、Magnus升力等; 颗粒间作用力包括范德华力、静电力、液桥力、摩擦力和碰撞力等。在流场外部力和颗粒间作用力共同作用下, 处于管道壁剪切区的颗粒向管道中心柱塞流动区迁移, 管道中心的细颗粒向管壁附近迁移。本文的研究, 能够明晰目前膏体充填管道输送过程中形成柱塞流结构和边壁滑移层的内在机理, 为矿山膏体充填工艺提供理论指导。

[关键词] 膏体充填; 管道输送; 颗粒迁移; 力学作用机理

[中图分类号] TD853 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 2097-2423(2024)06-0001-12

DOI: 10.19610/j.cnki.cn10-1873/tf.2024.06.001

0 前言

膏体充填技术因具有安全性和经济优势以及符合国家发展环保需求, 普遍用于治理矿山开采过程中形成的尾矿库和采空区, 是未来矿山生产发展的主要方向^[1-2]。管道输送对膏体充填的效率和质量起着关键性作用, 影响膏体充填工艺的整体进程^[3], 因此, 确保管道输送的高效稳定运行是实现膏体充填的关键^[4]。

纵观国内外有关非牛顿黏弹性流体中颗粒迁移行为的研究, 目前已有较多的理论成果, 涉及医学、

化学、生物和环境等领域, 如微流控领域的颗粒定向控制技术^[5]。研究主要集中在颗粒聚集、分离、捕捉技术, 以及利用电、磁、声和光学场等外力, 或悬浮液内在水动力定向诱导的颗粒迁移等, 但目前的研究并未形成统一的颗粒迁移机制。膏体充填料浆因由不同粒径尾砂颗粒组成, 在输送过程中会以细颗粒与水为载体, 承载粗颗粒, 表现出与传统尾矿料浆完全不同的流动行为, 细颗粒承载流的流变学机制仍没有明晰。充填管道的非透明性和深埋于地下的特性, 无疑增大了颗粒迁移行为的研究难度。总之, 研究颗粒动态迁移行为成为当前研究的难点。

本文通过综述国内外悬浮液体系管道输送的相关文献, 借鉴悬浮液体系输送过程中颗粒迁移行为的相关理论, 分析稠密膏体体系中颗粒受到的作用力, 准确获得尾砂颗粒迁移行为的本质, 明晰充填矿浆管道输送过程中颗粒迁移行为的力学成因; 分析管道输送时颗粒迁移行为的影响因素, 归纳基于力学机理的迁移模型, 突出尾砂颗粒的尺度效应对管道输送的影响, 从而了解悬浮液体系管道输送时颗粒迁移行为的研究现状以及趋势, 进而为膏体料浆管道输送时颗粒迁移行为的研究提供理论指导。

[收稿日期] 2024-07-15

[作者简介] 王辉(1998—), 男, 甘肃陇南人, 硕士, 主要从事膏体充填等方面的研究工作。

[通信作者] 段文权(1982—), 男, 湖南人, 硕士, 教授级高级工程师, 主要从事矿山开采方面的研究。

[引用格式] 王辉, 段文权, 刘敬智, 等. 膏体料浆管输过程中颗粒迁移行为研究[J]. 绿色矿冶, 2024, 40(6): 1-12.

WANG Hui, DUAN Wenquan, LIU Jingzhi, et al. Research on particle migration behavior during paste slurry pipeline transportation[J]. Sustainable Mining and Metallurgy, 2024, 40(6): 1-12.

1 颗粒迁移行为

颗粒迁移行为(SIPM)是指悬浮液进行管道输送时由于剪切作用的非均匀性,颗粒间发生不平衡碰撞,高剪切区域的尾砂颗粒向低剪切区域移动,出现尾砂颗粒偏离水动力流线的现象^[6]。剪切诱导作用使悬浮液中粗颗粒沿着剪切速率递减的方向发生自扩散运动^[7],粗颗粒在管道中心的堆积,导致均质悬浮液在输送过程中形成柱塞结构^[8]。

对于悬浮液管道输送过程剪切诱导颗粒迁移行为,研究人员采用实验手段如核磁共振成像(NMR)、激光多普勒测速(LDV)和折射率匹配(RI)技术进行研究,通过测定相应技术指标的变化,可知粗尾砂颗粒从高剪切速率区域向低剪切速率区域迁移^[9]。也有研究采用数值计算方法,结合斯托克斯动力学、力耦合法和浸入边界法等理论确定颗粒位置的分布变化以及定量分析颗粒间力学作用数值。

从细观力学机理来看,颗粒间作用力与外部力学作用是诱导颗粒迁移行为的内在因素。研究外部力,必须考虑重力、黏性力、浮力、Saffman升力、Magnus升力的共同作用。悬浮液体系中颗粒间作用形式包括黏结、碰撞以及摩擦等^[10],因此在输送过程中,颗粒间作用力包括静态非接触力和动态接触力,其中静态非接触力包括范德华力、静电力、液桥力,动态接触力包括颗粒间的摩擦力和碰撞力^[11]。

综上所述,管道输送过程中剪切诱导颗粒迁移行为受力学作用的影响,粗尾砂颗粒以较低的剪切速率迁移到管道中心^[12],水和较细的颗粒向管道壁面迁移以填充空间^[13]。由于剪切作用沿径向上的分布不同,尾砂料浆出现柱塞结构,产生沿管道径向上的黏度梯度,阻碍了颗粒迁移行为进程,最终形成稳定的结构。

颗粒迁移行为示意图如图1所示。

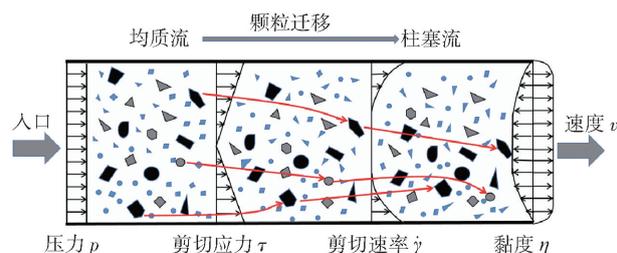


图1 颗粒迁移行为示意图

2 力学致因

为确定悬浮液流动和颗粒的迁移行为轨迹,除了需要定量考虑有关流体动力学的信息,明确颗粒与流体的相互作用,也不能忽略颗粒与颗粒之间的不可逆相互作用。尤其对于分散稠密的非牛顿悬浮液,要考虑颗粒间的作用形式,才能明确颗粒间力的作用机理,以及管道径向出现柱塞结构的内在原因,得到管道内悬浮液速度、固体质量分数剖面出现钝化的本质原因。

2.1 流场外部力

在膏体料浆输送过程中流场势必会对尾砂颗粒产生影响,因此研究管输过程中的颗粒迁移行为时,必须考虑重力、黏性力、浮力、Saffman升力、Magnus升力,综合分析这些力在颗粒迁移过程中的作用。

2.1.1 重力

悬浮液流动时必须考虑由重力引起的颗粒迁移^[14]。制备的料浆若要保持均匀,不出现粗颗粒沉降现象,料浆必须具有足够的屈服应力^[15]或足够速率的触变结构^[16],才能快速建立能够支撑最粗颗粒的结构^[17]。当料浆流动时,粗尾砂颗粒和周围悬浮液之间的密度差所产生的应力,导致粗尾砂颗粒周围产生局部流动而出现颗粒迁移行为^[18]。

因此,重力诱导颗粒迁移不是一个扩散过程,而是一个平流过程。在输送过程中,重力诱导产生颗粒迁移,迫使具有密度差的混合料浆各组分产生分离,与悬浮料浆的黏度发生竞争^[19]。由粗颗粒与悬浮液之间密度差引起的力可以写成式(1)。

$$F_{\text{gravity}} = \frac{g\Delta\rho\pi a^3}{6} \quad (1)$$

式中, $\Delta\rho$ 为粗颗粒与悬浮液之间的密度差, kg/m^3 ; a 为尾砂颗粒直径, m 。

随着料浆输送过程中重力诱导产生颗粒迁移,局部固体质量分数增大,并在达到最大堆积密度之前停止。因此,由重力引起的颗粒迁移产生固体质量分数的最大变化与剪切诱导的颗粒迁移效果相同,见式(2)^[15]。

$$\Delta\phi^{\text{gravity}} = \Delta\phi^{\text{shear}} = \phi_0 \left(1 - \frac{\phi_0}{0.8\phi_m}\right) \quad (2)$$

式中, ϕ_0 为混合料浆固体质量分数,%; ϕ_m 为料浆最大固体质量分数,%。

2.1.2 黏性力

基于颗粒间的不平衡碰撞,大量粗颗粒向柱塞

区迁移,聚集在管道中心,使得管道中心区域的料浆固体质量分数增大;与此同时,由于大量的水和细颗粒迁移至管壁附近,管道中心和壁面附近的局部固体质量分数相差很大,导致管道径向流场中形成明显的固体质量分数梯度^[20],造成管道中心尾砂颗粒排列密集,影响料浆的流变性质^[21],此时管道中心悬浮液黏性阻力增加^[22],抑制粗颗粒向管道中心的进一步迁移^[23]。

研究表明,黏性力对颗粒迁移抑制作用的强弱与料浆黏度、颗粒粒径有关^[17]。黏性力可以由牛顿流体中斯托克斯定律计算(式(3))。

$$F_{\text{viscous}} = 3\pi\mu_0 av_s \quad (3)$$

式中, F_{viscous} 为黏性力,N; μ_0 为悬浮液的黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; v_s 为悬浮流体中粗颗粒的相对沉降速度, m/s 。

一方面,黏度变化抑制粗颗粒向管道中心迁移;另一方面,粗颗粒的缺失会导致近壁面黏度下降,黏度不均匀会驱使细颗粒向管壁移动^[24]。因此,在悬浮液体系输送过程中,柱塞结构的形成必会影响料浆的均质性,此时由于质量守恒,粗颗粒和细颗粒的迁移具有很强的相关性,粗颗粒远离管壁向管道中心移动,而粗颗粒的缺失必然促使细颗粒向壁面附近移动,导致边壁附近细颗粒的堆积^[25]。从机理上可以解释为,管道输送过程剪切速率梯度导致粗颗粒向管道中心移动,而黏性力抑制粗颗粒向管道中心移动,驱动细颗粒向管道壁移动。

2.1.3 浮力

处于料浆中的尾砂颗粒,在流动过程中会受到浮力作用,浮力大小见式(4)。

$$F_B = \rho V_0 g \quad (4)$$

式中, F_B 为浮力大小,N; ρ 为流体密度, kg/m^3 ; V_0 为流体体积, m^3 ; g 重力加速度, N/kg 。

2.1.4 Magnus 升力

沿径向将膏体管道输送区域划分为3个区域,即管线中央的柱塞流动区、管壁的润滑区与剪切流区。在柱塞区,由于料浆呈柱形输送,速度相同,浆料不会产生升力;柱塞区之外,料浆颗粒处于流场中,且具有流速梯度,此时颗粒受到升力作用。当颗粒粒径较大时,这种升力更大,而对于粒径较小的颗粒,升力则几乎可以忽略,所以这种升力只影响料浆中的粗颗粒。

Magnus 升力产生于速度梯度,导致粗颗粒的两侧流速存在差异,发生自旋运动,促使尾砂颗粒在管径方向上产生相对位移,其方向垂直于料浆流动方

向,与颗粒运动方向一致,因此,对于管道内的粗颗粒,Magnus 升力的方向从壁面指向管道的中央,其计算见式(5)。

$$F_{\text{Magus}} = C_{\text{lift}} r^3 \rho v \quad (5)$$

式中, F_{Magus} 为Magnus升力; C_{lift} 为Magnus升力系数,其值为 $16\pi^3/3$; s 为角速度, $1/\text{s}$; r 为尾砂颗粒半径, m ; ρ 为流体密度, kg/m^3 ; v 为迁移速度, m/s 。

2.1.5 Saffman 升力

流场中存在速度梯度时,颗粒两侧存在流速差,此时会形成Saffman升力,但颗粒未产生自旋运动,这就是Saffman升力和Magnus升力的不同。Saffman升力的计算见式(6)。

$$F_{\text{Saffman}} = 1.61 d_p^2 \sqrt{\rho\mu} (v - v_p) \sqrt{\left| \frac{d\mu}{dy} \right|} \quad (6)$$

式中, d 为颗粒直径, m ; ρ 为流体密度, kg/m^3 ; v 为迁移速度, m/s ; μ 为黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; $\frac{d\mu}{dy}$ 为速度梯度。

综上,基于流场外部力的角度进行分析,膏体料浆颗粒的受力情况如图2所示。

膏体料浆在静止状态下不会沉降,其内部颗粒是悬浮的,外部作用力互相抵消。在输送过程中,颗粒形成柱塞区与剪切区,剪切区管道径向存在速度梯度而产生升力,诱导粗颗粒向柱塞区移动,而柱塞区内不存在速度梯度,尾砂颗粒由于料浆的黏附作用,迁移行为逐渐停止而稳定停留在柱塞区,造成柱塞区质量浓度增大。

2.2 颗粒间力学作用

除了受外部流场作用力,膏体料浆输送过程中内部的尾砂颗粒也会受到颗粒之间的作用影响。因此,研究颗粒间的作用对于分析颗粒迁移行为非常重要。研究表明,膏体体系中颗粒间作用形式包括黏结、碰撞以及摩擦等^[10]。通过判断颗粒间作用形式,综合考虑料浆固体质量分数、颗粒粒径以及剪切作用三者的耦合作用,可以确定悬浮液管道输送过程中颗粒主要受静电力、液桥力、颗粒间摩擦力、碰撞力以及引起尾砂颗粒产生布朗运动的范德华力的作用。

2.2.1 范德华力

悬浮液中尾砂颗粒产生不规则运动,发生布朗扩散^[26]。研究发现,范德华力是形成布朗扩散的主要作用,是颗粒间微观力学作用的主要类型^[27]。

当组成悬浮液的颗粒粒径较大时,布朗扩散引起的颗粒迁移行为可忽略,只有颗粒粒径较小时

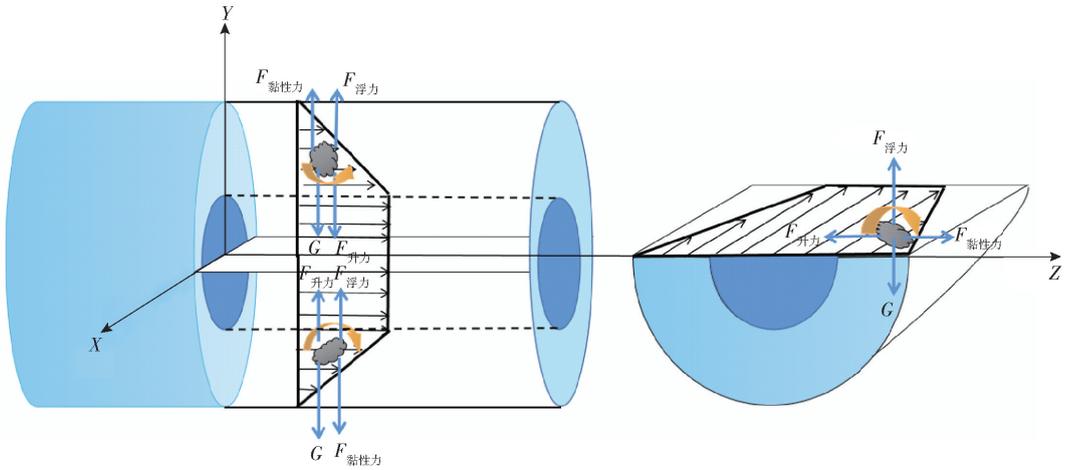


图2 流场外部力示意图

(nm级颗粒),才需考虑布朗扩散对颗粒迁移行为的影响^[28]。目前普遍通过数值模拟手段即流体力学(CFD)计算定性分析布朗扩散引起的颗粒迁移^[29]。有少量研究使用聚焦显微镜等物理实验装置研究布朗颗粒在悬浮液管道内的流动过程,发现悬浮液流动过程中会发生颗粒迁移行为。后来相关研究形成了表征颗粒迁移强度的理论,目前使用 P_e 数来表征剪切诱导颗粒迁移行为与布朗扩散的相对强弱^[30]。

$$P_e = \frac{6\pi\eta_0\gamma a^3}{KT} \quad (7)$$

式中, γ 为剪切速率, s^{-1} ; η_0 为悬浮液的黏度, $Pa \cdot s$; a 为颗粒直径, m ; K 为玻尔兹曼常数; T 为温度, $^{\circ}C$ 。

2.2.2 静电力

通常情况下,两个固体颗粒之间接触会产生电荷。固体间的互相接触会引起摩擦带电和电势差带电。目前理论上可以通过最大荷电荷理论模型来量化静电荷的大小。颗粒间静电力计算^[31]见式(8)。

$$F_e = \frac{Q^2 \left[1 - \frac{Z_0}{(r^2 + Z_0^2)^{\frac{1}{2}}} \right]}{16\pi\epsilon_0 Z_0^2} \quad (8)$$

式中, F_e 为静电力, N ; ϵ_0 为真空中的介电常数; Z_0 为静电力发生距离, m ; r 为尾砂颗粒半径, m ; Q 为颗粒带电荷量, c 。

2.2.3 液桥力

液桥力表现为当表面湿润的尾砂颗粒彼此接近时,颗粒接触处和周围产生液桥,导致黏结,从而形成颗粒间黏结系统^[32],其本质是一个毛细作用力。当物料的相对湿度大于5%时,颗粒间的水分子会产生液体桥。两个等径颗粒间的液体桥力计算见

式(9)^[33]。

$$F_H = 2\pi\gamma r \quad (9)$$

式中, F_H 为液桥力, N ; γ 为湿颗粒表面张力系数; r 为尾砂颗粒半径, m 。

非等直径的尾砂颗粒间液桥力可以近似表示为式(10)。

$$F_H = 2\pi\gamma\rho_2(1 + H\rho_2) \quad (10)$$

其中, $H = \frac{\rho_2 - \rho_1}{2\rho_2\rho_1}$ (11)

式中, H 为液体桥平均曲率; ρ_2, ρ_1 为尾砂颗粒曲率。

当料浆中的水分含量超过60%时,液桥力的影响大于静电力。管道输送时在近壁面区,固体颗粒明显大量聚集,说明液桥力对颗粒的影响很大。

目前,范德华力与静电力可用原子力显微镜和电子显微镜进行测定^[34];液桥力的测定多采用微力传感器测定,力传感器接触液桥架,位移传感器接触上盘,即可获得相应的液桥力。

2.2.4 颗粒间摩擦力

研究发现,颗粒处于受剪切的摩擦层间时,悬浮液体系表现出固液特性^[35]。从固体特性来讲,颗粒间的摩擦作用与颗粒的基本特性相关,如颗粒粒径、颗粒形状等;从流体特性来讲,颗粒间的摩擦作用受剪切速度、料浆流速等因素影响^[36],此时悬浮颗粒流体体系内颗粒间接触特性和动力学非常复杂。

基于悬浮液颗粒间的离散性和复杂性,以及颗粒间摩擦作用演变关系的不确定性,国内外学者普遍通过离散单元法来研究该复杂体系^[37]。通过离散元方法,相关研究发现由不同粒径颗粒组成的悬浮液进行管道输送时,由于细颗粒填补了粗颗粒间隙,颗粒之间互相接触,摩擦润滑作用是促进料浆平

稳流动的关键因素。

根据有关颗粒悬浮液的模拟,可以明确摩擦力对流变性能的影响极大,主要影响悬浮液黏度^[38]。随着剪切速率的增加,颗粒间接触从润滑切换到摩擦,导致黏度急剧增加。在流动的轴向上,剪切流使颗粒之间的距离更近,此时微观结构和接触力的共同作用在悬浮液中产生强应力,从而促进颗粒之间接触,产生较大的摩擦力^[39]。

根据颗粒间摩擦作用强弱机制的不同,把实际的颗粒流分为“稀疏剪切颗粒流”和“稠密剪切颗粒流”两种类型^[40]。颗粒流中摩擦接触网络的衍生,使得表征颗粒接触性能的有效摩擦系数增加,此时产生剪切流动,导致复杂的流变响应^[41],产生不同的宏观流动行为。

因此,颗粒间摩擦作用影响悬浮液体系中的颗粒迁移行为,在宏观上表现为悬浮液流变特性的变化。在贯穿整个悬浮液管输过程的剪切作用下,当剪切速率较低时,悬浮液中的固体颗粒主要受摩擦作用影响;随着剪切速率的增大,颗粒间相对速度增大,导致颗粒间的稳定性被破坏,增大的剪切作用把流体从颗粒间隙中挤出,使得固体颗粒相互靠近,而缩小的颗粒间距离则会导致悬浮液摩擦作用加强。增大的摩擦力会使得颗粒的运动发生变化,导致悬浮液表观黏度大幅增加,管道中心的悬浮液黏度升高,悬浮液管道径向流变性能发生改变,进而抑制颗粒迁移行为。

总之,悬浮液由于摩擦作用而出现固体颗粒流与流体的特性,致使该体系内颗粒间的接触特性和动力学非常复杂且多变,仍有待进一步研究。但可以确定的是,颗粒间摩擦作用的差异性产生颗粒流力学机制和宏观、细观、微观流变特性差异的本质因素。

2.2.5 颗粒间碰撞力

实际悬浮液输送过程中,剪切区固体颗粒频繁地发生碰撞。颗粒间碰撞作用复杂且易变,通过实验测量颗粒间碰撞作用力非常困难,目前研究手段主要为数值模拟,相关研究形成了黏弹性屈服悬浮液流体颗粒迁移理论^[42]。该理论认为颗粒迁移完全由颗粒间不可逆碰撞造成^[43],颗粒倾向于随着碰撞频率和悬浮液黏度的梯度变化而发生迁移,造成管道流动中的悬浮液固体质量分数以及管道径向悬浮料浆流变特性出现梯度变化^[44]。简言之,剪切区颗粒间相互碰撞产生的颗粒迁移运动是影响颗粒流

悬浮液流动行为的本质因素。

结合管道输送相关理论,可以认为在靠近壁面剪切区范围内,黏性作用减弱,碰撞作用增大,颗粒向管道中心迁移,颗粒材料表现流体特性^[45]。在靠近管道中心一定范围内,黏性作用增强,碰撞作用作用减弱,颗粒向管道中心的迁移受到限制,颗粒材料表现出类固特性^[46]。因此,颗粒间碰撞作用是控制悬浮体系流动行为的关键因素。也就是说,当其碰撞作用过强时,颗粒间的微观结构不易形成或形成后被破坏,造成尾砂颗粒处于离散状态,因此悬浮液体系的黏度较低,屈服应力很小;反之,碰撞作用过小,颗粒就极易形成团块,体系的黏度较高,屈服应力较大。因此颗粒间碰撞作用影响悬浮料浆的流变特性,进而改变颗粒运动状态,使其迁移行为发生改变。

总之,明晰悬浮液体系中颗粒间的相互作用力,有助于分析颗粒间的力学作用机理,进而解释悬浮液宏观流动性以及颗粒运动情况。也就是,剪切区颗粒迁移是由颗粒间不可逆碰撞造成的,产生碰撞频率和悬浮体系黏度的梯度变化,造成管道中悬浮液出现宏观柱塞结构。

综上,颗粒间受力情况如图3所示。

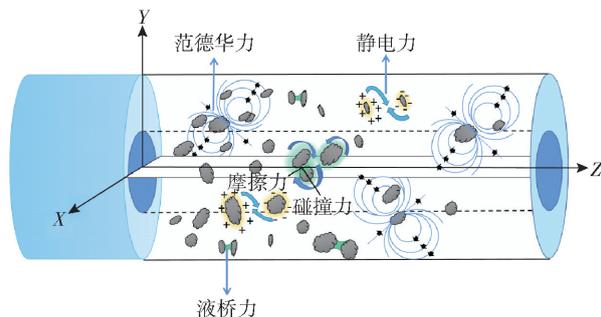


图3 颗粒间作用力示意图

3 颗粒迁移行为影响因素

目前,国内外学者研究发现,颗粒迁移行为不仅受到其本身粒径大小、质量和形状的影响,还与外界输送条件息息相关,影响因素如图4所示。

3.1 固体质量分数

料浆固体质量分数对颗粒迁移行为有重要影响。有研究通过物理手段如磁共振成像(MRI)观察到,当料浆固体质量分数低于20%时,屈服性悬浮液中的颗粒迁移行为不明显,而当固体质量分数增加时,颗粒迁移现象明显增强^[47]。因此,在一定的范围内,随着料浆固体质量分数的增加,颗粒间的碰

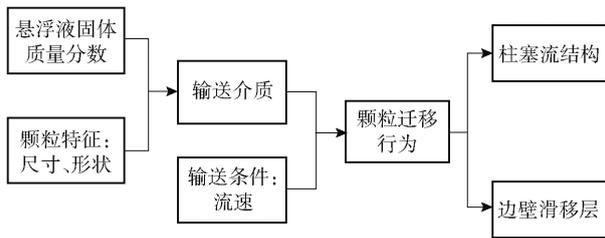


图4 颗粒迁移行为影响因素示意图

撞作用变强,颗粒从高固体质量分数区域向低固体质量分数区域迁移的趋势增强^[22]。但是随着管道中心悬浮液固体质量分数的增加,管道中心线附近的黏度增加,与此同时,壁面附近的黏度降低,管道径向黏度梯度变大,黏性阻力作用变大。当管道中心料浆固体质量分数足够高时,料浆颗粒接近最大堆积状态时,黏度梯度足够大,此时迁移机制发生改变,以至于悬浮黏性阻力相关的迁移通量超过了剪切引起的迁移通量^[48],从而导致管道中心颗粒径向迁移速度几乎为零,即黏度梯度效应抑制剪切梯度效应引起的颗粒迁移行为。

由此可见,料浆固体质量分数对颗粒迁移的影响并非单纯线性的。当料浆固体质量分数过低,颗粒迁移引起的黏度效应变化极小,可以近似忽略;反之,固体质量分数过高,管道中心料浆颗粒接近最大堆积状态,抑制颗粒迁移行为的进行。

3.2 颗粒形状

组成悬浮液的颗粒形状各不相同,因此研究颗粒形状对迁移行为的影响具有很大的工程意义。目前研究主要对比了有角天然骨料与圆形磨球的迁移行为,生产实践表明圆形磨球容易在料浆流动中迁移,而有角天然骨料迁移较小^[49]。颗粒形状对迁移行为的影响体现在固有黏度的差别。目前采用偏球形颗粒的分形维数表征颗粒形状,偏球形颗粒的分形维数越大,固有黏度越大,而固有黏度与阻碍颗粒迁移的流体曳力正相关^[50],也与悬浮液流变特性相关^[51]。因此,从悬浮液流变特性与流体曳力角度分析,有角天然骨料固有黏度大于圆形磨球,阻碍天然骨料颗粒迁移的能力大于圆形球颗粒,最终出现圆形磨球在料浆流动中容易迁移,而有角天然骨料迁移小的结果。因此,颗粒形状越接近于球形,在悬浮料浆中受到流体黏性阻力越小,此时迁移行为效果越明显,所以可建立颗粒形状和颗粒迁移之间的因果关系。

综上,从流体曳力以及料浆流变特性角度研究悬浮液中颗粒形状对迁移行为影响具有重要意义,

但还需要进一步研究,建立颗粒分形维数-固有黏度-料浆流变性能-流体曳力定量关系式,形成悬浮液输送时颗粒形状对迁移行为的理论基础。

3.3 颗粒粒径

目前普遍基于颗粒的固体质量分数分布评价和表征颗粒迁移能力的大小,通过实验结果可知随着颗粒粒径的增大^[8],颗粒受到的不平衡碰撞越显著,管道中心的料浆固体质量分数越大,迁移行为越明显^[48];相反,颗粒越小,料浆固体质量分数在管道轴向平面上的分布就越均匀。也有研究基于颗粒的迁移速度大小来表征颗粒迁移能力强弱,对比说明颗粒的粒径大小对颗粒迁移能力的影响。

理论研究表明,颗粒迁移能力与颗粒粒径呈二次变化关系^[52],即迁移能力随粒径的增大先增大后减小^[53],原因在于细颗粒填补粗颗粒的间隙,细颗粒运动受粗颗粒的控制,粗颗粒运动也受到细颗粒的限制,此时中等粒径的颗粒有较大的迁移空间,迁移行为相对较明显。也有部分研究认为颗粒粒径越大,颗粒迁移能力越大^[54]。上述研究结果差异在于研究对象粒径的分布范围不同。因此,悬浮液进行输送时,必须考虑颗粒粒径对迁移行为带来的影响。

3.4 料浆流速

研究发现随着悬浮液流速的增大,颗粒迁移程度增大^[55]。一方面,流动产生的颗粒随机碰撞^[56]是影响颗粒行为的主要因素^[57];另一方面,悬浮液流动产生的惯性也会影响颗粒迁移行为。因此料浆流速对颗粒迁移的影响,体现在颗粒间作用力的变化,以及从而引起的颗粒间碰撞作用发生变化。流速增大,颗粒之间的剪切作用增强,悬浮液内部结构受到破坏,颗粒间碰撞作用增强,管道径向剪切梯度增大,颗粒迁移能力提高;料浆流速降低,管道内不同位置料浆流速梯度降低,相应地颗粒向管道中心迁移能力减小^[48]。且悬浮液流动产生的惯性作用促进固体颗粒迁移,当流动速率增加时,颗粒惯性增大,表现出更强的迁移趋势^[58]。

通过对上述影响因素的分析,颗粒迁移行为极其复杂,受多种因素共同影响,明确其影响对把握整个管道输送进程具有重要的意义。在研究过程中,需要综合考虑各方面的影响因素,进行多因素优化设计,实现最优的输送效果。

4 颗粒迁移模型

目前在基于流变学研究描述悬浮液的颗粒迁移

行为^[59]方面,Leighton 和 Acrivos 最先提出采用固体质量分数和剪切强度来描述颗粒迁移行为。之后 Phillips 等^[60]提出了扩散通量模型(DFM)来模拟颗粒在浓悬浮体中的复杂扩散过程,指出颗粒扩散通量由剪切速率和颗粒固体质量分数的梯度决定^[59],高频碰撞的颗粒可以迁移到碰撞频率较低的区域,且这种碰撞频率与颗粒的剪切速率和局部固体质量分数成正比。DFM模型还考虑了迁移过程的黏性力。颗粒迁移过程中会经历不同程度的黏性阻力,其差异导致颗粒向低黏度区的迁移程度大,向高黏度区域迁移程度小,最终产生管道内颗粒分布的柱塞结构。

为了更深入地了解颗粒迁移,后面不断形成连续宏观模型,如 Nott 和 Brady 的悬浮平衡模型(SBM)^[61]。SBM模型涉及求解悬浮体系的动量方程、颗粒输运方程和悬浮液的能量守恒方程,使用粒子分辨斯托克斯动力学模拟,通过力学分析解释了颗粒如何从均匀体积分数的悬浮液迁移到剪切率较低的管道中心。

Morris 和 Boula 优化了 SBM 模型^[62],强调由非均匀性应力引起的颗粒应力张量的偏移是颗粒迁移的驱动力,这种应力状态迫使颗粒迁移从而达到平衡。双流体模型(TFM)用于求解颗粒相和流体相的控制(质量和动量守恒)方程^[63],可以处理浓缩悬浮液中布朗迁移和剪切诱导迁移的耦合效应。后续研究人员又提出了混合模型,即将悬浮液视为有效流体,将颗粒视为离散相,当流体和离散相形成的流场发展到局部平衡保持不变时,颗粒迁移达到平衡状态。

总之,随着研究水平的不断深入,研究角度从宏观转变到微观,颗粒迁移理论也在不断更新完善,但核心在于管道内颗粒受力模型的构建。

因此,要研究颗粒迁移行为,对管道内的尾砂颗粒进行受力分析是前提。由于颗粒迁移行为受到尾砂颗粒所处的位置和尾砂粒径的共同影响,针对管道输送过程中不同位置、不同粒径的尾砂颗粒进行全力学分析,可以得到其迁移行为的力学机理,具体受力如图5所示。

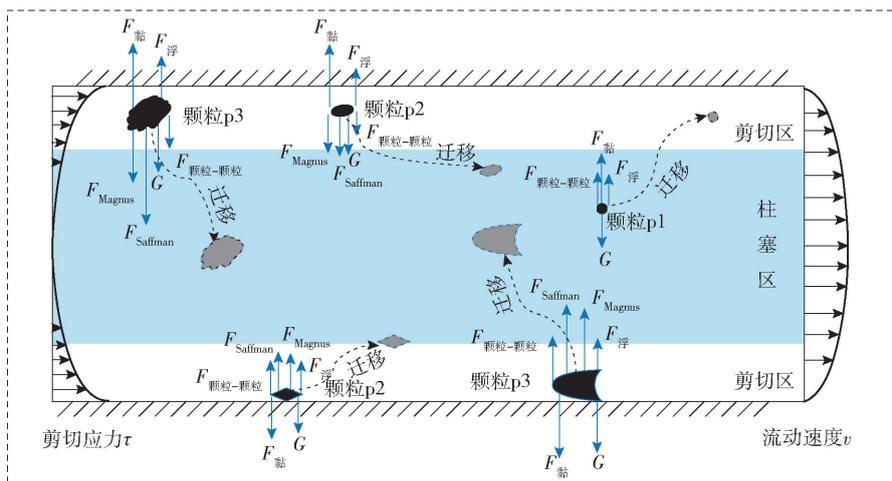


图5 不同位置不同粒径尾砂颗粒受力分析

4.1 上管壁附近不同粒径尾砂颗粒迁移行为的力学分析

在上管壁附近,不同粒径的尾砂颗粒,如图5中的尾砂颗粒 p3 和颗粒 p2,受到升力及颗粒间作用力不同,导致其迁移能力也不尽相同。

膏体料浆处于静止状态时,尾砂颗粒 p3 和 p2 不会出现沉降现象,其受力方程见式(12)。

$$G - F_{\text{浮}} + F_{\text{vw}} + F_e + F_H + F_c + F_f = 0 \quad (12)$$

式中, G 为重力, N ; $F_{\text{浮}}$ 为浮力大小, N ; F_{vw} 为颗粒间范德华力大小, N ; F_e 为颗粒间静电力, N ; F_H 为颗粒间液桥力, N ; F_c 为颗粒间碰撞力, N ; F_f 为颗粒间摩

擦力, N 。

膏体料浆进行输送时,管道径向料浆受到不同的剪切作用,所以处于剪切区域和柱塞区域的尾砂颗粒受力情况不同。在剪切区域,由于颗粒处于具有一定速度梯度的流场中,因而会出现 Magnus 升力和 Saffman 升力。研究发现,剪切区内粗尾砂颗粒 p3 的动能强于细尾砂颗粒 p2,因此粗尾砂颗粒 p3 的碰撞力强于细尾砂颗粒 p2。由于这两种升力和颗粒间力的共同作用破坏了“静止态”的平衡,粗颗粒从剪切流动区向柱塞流动区迁移。

因此,剪切区中靠近上管壁的尾砂颗粒受力方程式见式(13)。

$$G - F_{\text{浮}} - F_{\text{黏}} + \sum F_{\text{P-P}} + F_{\text{Saffman}} + F_{\text{Magnus}} = F_{\text{合}} \quad (13)$$

式中, F_{Saffman} 为 Saffman 升力, N; F_{Magnus} 为 Magnus 升力, N; $F_{\text{黏}}$ 为黏性力, N; $F_{\text{合}}$ 为尾砂颗粒所受合力, N; $F_{\text{P-P}}$ 为颗粒作用力合力, N。

Magnus 升力和 Saffman 升力的大小均与颗粒尺寸成正比,因此,处于同一位置的不同粒径的尾砂颗粒 p3 和 p2,受到升力作用不尽相同(式(14))。

$$F_{\text{Saffman}(p3)} + F_{\text{Magnus}(p3)} > F_{\text{Saffman}(p2)} + F_{\text{Magnus}(p2)} \quad (14)$$

也就是说,尾砂颗粒 p3 所受到的升力大于颗粒 p2,进而体现在合力的差异性(式(15))。

$$F_{\text{合}(p3)} > F_{\text{合}(p2)} \quad (15)$$

因此,基于力学分析可知,尾砂颗粒 p3 向管道中心迁移的能力强于尾砂颗粒 p2,尾砂颗粒 p3 迁移距离较大至管道中心,尾砂颗粒 p2 迁移距离较小,未达到管道中心。不同粒径尾砂颗粒迁移效果存在差异,造成膏体料浆管道输送过程中出现管道中心的粗尾砂颗粒含量增加,料浆浓度增加的现象。

4.2 下管壁附近不同粒径尾砂颗粒迁移行为的力学分析

在下管壁附近,不同粒径的尾砂颗粒,如尾砂颗粒 p3 和颗粒 p2,受到升力及颗粒间作用力不同,导致其迁移能力也不尽相同。

对于静止的膏体料浆,内部的尾砂颗粒 p3 和颗粒 p2 保持静止,其受力方程见式(16)。

$$G - F_{\text{浮}} - (F_{\text{vw}} + F_e + F_H + F_c + F_f) = 0 \quad (16)$$

流动过程中,由于流动剪切作用,位于下管壁附近剪切区内的尾砂颗粒,会受到向上的 Magnus 升力和 Saffman 升力,且剪切区内粗尾砂颗粒 p3 的动能强于尾砂颗粒 p2,因此粗尾砂颗粒 p3 受到的碰撞力强于细尾砂颗粒 p2。由于这两种升力和颗粒间力的共同作用破坏了“静止态”的平衡,粗颗粒从剪切流动区向柱塞流动区迁移。因此,剪切区靠近下管壁的尾砂颗粒的受力见式(17)。

$$G - F_{\text{浮}} + F_{\text{黏}} - \sum F_{\text{P-P}} - F_{\text{Saffman}} - F_{\text{Magnus}} = F_{\text{合}} \quad (17)$$

Magnus 升力和 Saffman 升力的大小都与颗粒粒径成正比,因此,处于同一位置的不同粒径的尾砂颗

粒 p3 和 p2,受到升力作用不尽相同,即:

$$F_{\text{Saffman}(p3)} + F_{\text{Magnus}(p3)} > F_{\text{Saffman}(p2)} + F_{\text{Magnus}(p2)} \quad (18)$$

由上述式(18)可知,颗粒 p3 所受到的升力大于颗粒 p2 所受到的升力,因此所受合力也符合相同规律,见式(19)。

$$F_{\text{合}(p3)} > F_{\text{合}(p2)} \quad (19)$$

因此,尾砂颗粒 p3 向管道中心迁移的能力强于尾砂颗粒 p2,此时尾砂颗粒 p3 迁移距离较大至管道中心,尾砂颗粒 p2 迁移距离较小,未达到管道中心,因此不同粒径尾砂颗粒迁移能力不同,形成管道中心的粗尾砂颗粒含量高。

综合上述,对不同位置的尾砂颗粒进行受力分析,由于 Magnus 和 Saffman 两种升力以及颗粒间力的共同作用,粗尾砂颗粒从管壁剪切区向管道中心柱塞区流动,也就是发生宏观层面上的颗粒迁移行为。

当尾砂颗粒迁移至柱塞区时,但由于柱塞流动区没有速度梯度,当 Magnus 升力和 Saffman 升力两种升力完全消失时,黏性力抑制颗粒迁移,其径向运动终止,并在柱塞流动区趋于稳定,从而保持了管道中心粗颗粒含量较高的状态。

4.3 管道中心附近细颗粒迁移行为的力学分析

由于粗颗粒由管壁附近向管道中心迁移,管壁附近料浆的黏度降低,管道中心的黏度增高,黏度差异性产生黏性力,促进初始位于管道中心的细颗粒 p1 向管壁附近迁移。其受力分析见式(20)。

$$F_{\text{黏}} + F_{\text{浮}} - G + \sum F_{\text{P-P}} = F_{\text{合}} \quad (20)$$

由式(20)可知,尾砂颗粒 p1 所受的合力方向指向管道边壁,由于合力的作用破坏了细颗粒“静止态”的平衡,细颗粒从柱塞流动区向剪切流动区迁移,即由管道中心向管壁附近迁移。

细尾砂颗粒向管壁迁移过程中,料浆黏度差逐渐减小,黏性力逐渐降低,合力也逐渐减小。当颗粒所受合力为零后,细颗粒迁移行为也停止。此时受力见式(21)。

$$F_{\text{浮}} - G + \sum F_{\text{P-P}} = F_{\text{合}} \quad (21)$$

黏性力消失后,细尾砂颗粒进入颗粒剪切区,此时细颗粒所受合力为零,但由于尾砂颗粒受到剪切后, Magnus 和 Saffman 两种升力的大小与尾砂粒径成正比,因此微细颗粒受到的升力可忽略,此时,细尾砂颗粒在剪切区处于受力平衡状态,随着料浆流动而沿管轴方向运动。

剪切诱导颗粒迁移行为的力学作用机理如图6所示。

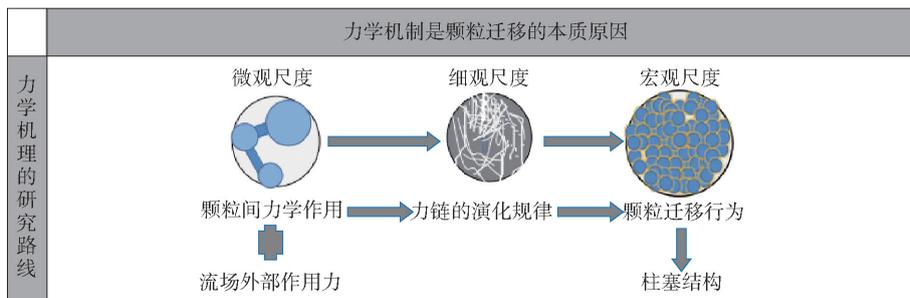


图6 剪切诱导颗粒迁移行为的力学作用机理图

5 结论与展望

5.1 结论

通过研究悬浮液体系管道输送过程中颗粒迁移机制、影响因素、颗粒间作用力等方面内容,得到以下的结论:

1)管道输送过程中颗粒迁移行为受到的流场外部力包括重力、黏性力、浮力、Saffman升力、Magnus升力。根据颗粒间作用形式,颗粒间的作用力分为静态非接触力和动态接触力,其中静态非接触力包括范德华力、静电力、液桥力;动态接触力包括颗粒间摩擦力和碰撞力。

2)颗粒迁移行为的影响因素较多,各因素之间并非独立,耦合作用较强。需要综合考虑各方面的影响因素,进行多因素优化设计,实现最理想的输送效果。

3)膏体料浆进行输送时,初始位于剪切区的颗粒处于具有一定速度梯度的流场,因而会出现Magnus升力和Saffman升力,两种升力的共同作用,破坏了“静止态”的平衡,因此,粗颗粒从剪切流动区向柱塞流动区迁移。尾砂颗粒迁移至柱塞区后,由于柱塞流动区没有速度梯度,当Magnus和Saffman两种升力完全消失时,粗颗粒的受力恢复到平衡,其径向运动终止,并在柱塞流动区趋于稳定,从而出现管道中心粗颗粒含量较高的现象。由于粗颗粒由管壁附近向管道中心迁移,管壁附近料浆的黏度降低,管道中心的黏度增高,此时黏度差异性产生黏性力,促使初始位于管道中心柱塞区的细颗粒向管壁附近迁移。

5.2 研究展望

随着悬浮液体系管输过程中颗粒迁移行为的方法论不断成熟,相关的检测手段更加丰富,因此存在以下展望:

1)目前关于颗粒迁移机理的揭示仍有待进一步研究。目前未有成熟统一的迁移理论来指导颗粒迁移行为,并且目前的模型存在一定的缺陷。如在DFM模型中剪切速率趋近于零的区域,颗粒固体质量分数趋于模型允许的最大值,黏度趋近于无穷大,从而使流体失去流动性,这与实际流动状态不符。

2)颗粒间作用力的研究,都是在忽略其他作用力并分析主要作用力对迁移行为的影响的前提下开展的,但实际膏体料浆管道输送时,颗粒的流动可能受到多力的共同作用。因此,颗粒轨迹和平衡位置是根据这些力的竞争结果来调整的,需要考虑单个作用力实验结果与实际工程存在较大差异的问题,稠密悬浮液中的颗粒间相互作用及其相关的动力学有待进一步研究。

3)目前的原位动态监测成像技术精度低,只能从宏观特定指标角度进行分析,无法使用实验设备准确观测颗粒的实际运动情况,需要进一步加强技术的突破。

[参考文献]

- [1] 吴爱祥,王洪江.金属矿膏体充填理论与技术[M].北京:科学出版社,2015.
- [2] 余南中.绿色开采与膏体充填[J].有色金属设计,2016,43(1):1-5.
- [3] 颜丙恒,李翠平,吴爱祥,等.膏体料浆管道输送中粗骨料颗粒运动规律分析[J].中南大学学报(自然科学版),2019,50(1):172-179.
- [4] 万串申,许文远,史采星,等.高浓度全尾砂浆大垂高长距离管道输送阻力计算与工程实践[J].中国矿业,2023,32(10):153-158.
- [5] YUAN D, ZHAO Q, YAN S, et al. Recent progress of particle migration in viscoelastic fluid[J]. Lab on A Chip, 2018.
- [6] DI VAIRA N J, LANIEWSKI W L, JOHNSON R L, et al. Influence of particle polydispersity on bulk migration and

- size segregation in channel flows [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2022, 939(430).
- [7] RASHEDI A, SARABIAN M, FIROUZANIA M, et al. Shear-induced migration and axial development of particles in channel flows of non-Brownian suspensions [J]. *AIChE Journal*, 2020.
- [8] SIQUEIRA I R, MARCIO S, CARVALHO. Particle migration in planar die-swell flows [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2017, 825:49 – 68.
- [9] 马超. MFI 型沸石基催化剂内分子扩散行为研究 [D]. 北京化工大学, 2015.
- [10] TONG R, HAN B, ZHANG X. Molecular dynamics simulation on collision frictional properties of a molybdenum disulfide (MoS_2) film in microgravity environment [J]. *Microgravity Science and Technology*, 2021, 33(4).
- [11] JAMSHIDI R, GILLISSEN J, ANGELI P, et al. Roles of solid effective stress and fluid-particle interaction force in modeling shear-induced particle migration in non-Brownian suspensions [J]. *Physical Review Fluids*, 2021, 6(1).
- [12] BUFFO A, VANNI M, RENZE P, et al. Empirical drag closure for polydisperse gas-liquid systems in bubbly flow regime: Bubble swarm and micro-scale turbulence [J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2016: 284 – 303.
- [13] SAINTILLAN D, SHELLEY M J. Active suspensions and their nonlinear models [J]. *Comptes Rendus Physique*, 2013, 14(6):497 – 517.
- [14] ROUSSEL N. A theoretical frame to study stability of fresh concrete [J]. *Materials and Structures*, 2006, 39(1).
- [15] LOWKE D, KRINKEL T, GEHLEN C, et al. Effect of cement on superplasticizer adsorption, yield stress, thixotropy and segregation resistance [J]. Springer Netherlands, 2010.
- [16] ROUSSEL N. A thixotropy model for fresh fluid concretes: Theory, validation and applications [J]. *Cement & Concrete Research*, 2006, 36(10):1797 – 1806.
- [17] ROUSSEL N. Steady and transient flow behaviour of fresh cement pastes [J]. *Cement & Concrete Research*, 2005, 35(9):1656 – 1664.
- [18] SPANGENBERG J, ROUSSEL N, HATTEL J H, et al. Flow induced particle migration in fresh concrete: Theoretical frame, numerical simulations and experimental results on model fluids [J]. *Cement and Concrete Research*, 2012, 42(4):633 – 641.
- [19] SHEN L, STRUBLE L, LANGE D. Modeling dynamic segregation of self-consolidating concrete [J]. *AcMaterials Journal*, 2009, 106(4):375 – 38.
- [20] NOTT P R, GUAZZELLI E, POULIQUEN O. The suspension balance model revisited [J]. *Physics of Fluids*, 2011, 23(4):043304.
- [21] RAMACHANDRAN A, LEIGHTON D T. The influence of secondary flows induced by normal stress differences on the shear-induced migration of particles in concentrated suspensions [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2008, 603:207 – 243.
- [22] GUAZZELLI L, POULIQUEN O. Rheology of dense granular suspensions [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2018, 852.
- [23] LOIMER T, NIR A, SEMIAT R. Shear-induced corrugation of free interfaces in concentrated suspensions [J]. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 2002, 102(2):115 – 134.
- [24] XIE X, ZHANG L, SHI C, et al. Prediction of lubrication layer properties of pumped concrete based on flow induced particle migration [J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 322.
- [25] OZENDA O, SARAMITO P, CHAMBON G. Shear-induced migration in concentrated suspensions: particle mass conservation, contact pressure and jamming [J]. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 2022, 304.
- [26] RUSSELL W B, SCHOWALTER W R. *Colloidal Dispersions* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1989: 65 – 87.
- [27] HAN K, XIAO J, ZHANG Z, et al. Effect of particle size distribution on flocculation and its growth in cement-ground limestone suspensions [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 262(1):120047.
- [28] VILLA S, BLANC C, DADDI-MOUSSA-IDER A. Micro particle Brownian motion near an air-water interface governed by direction-dependent boundary conditions [J]. *Journal of Colloid And Interface Science*, 2023, 629.
- [29] KANG H U, KIM W G, KIM S H. Effect of particle migration on the heat transfer of nanofluid [J]. *Korea-Australia Rheology Journal*, 2007, 19(3):99 – 107.
- [30] FRANK M, ANDERSON D, WEEKS E R, et al. Particle migration in pressure-driven flow of a Brownian suspension [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2003, 493:363 – 378.
- [31] ALBONETTI C, CHIODINI S, ANNIBALE P, et al. Quantitative phase-mode electrostatic force microscopy

- on silicon oxide nanostructures. [J]. *Journal of Microscopy*, 2020, 280(3).
- [32] 王猛. 循环流化床提升管内气固两相流的 DEM 数值模拟[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2013.
- [33] 郭百巍,刘兵,汪家道,等. 利用液体桥力的微球转移操作[J]. *清华大学学报(自然科学版)*,2005(5): 647-650.
- [34] 柳冠青. 范德华力和静电力下的细颗粒离散动力学研究[D]. 北京:清华大学,2011.
- [35] WANG Z Y, WANG W, LIU K. Pattern and load carrying behavior of force chains involving the typical shearing dilatancy process in frictional third-body interface [J]. *Engineering Mechanics*, 2013, 30(8): 258-265 (in Chinese).
- [36] MENG F, LIU K, WU H. Research on mechanical mechanism of shear dilatancy for granular flow lubrication [J]. *Engineering Mechanics*, 2018, 35(8): 246-254 (in Chinese).
- [37] CUNDALL P A, STRACK A. A discrete numerical model for granular assemblies [J]. *Geotechnique*, 1979, 29(1): 47-65.
- [38] PETERS, FRANCOIS, GHIGLIOTTI, et al. Rheology of non-Brownian suspensions of rough frictional particles under shear reversal: A numerical study[J]. *Journal of Rheology*,2016, 60(4).
- [39] GALLIER S, LEMAIRE E, PETERS F. Rheology of sheared suspensions of rough frictional particles [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 757, 514-549.
- [40] ZHAO B, WANG J. A note on the kinetic theory of polydisperse granular flow [J]. *Chemical Engineering Science*, 2020, 223: 1-4.
- [41] STANY G, ELISABETH L, FRANÇOIS P. Rheology of sheared suspensions of rough frictional particles [J]. *Journal of Fluid Mechanics*,2014, 757.
- [42] VISHNAMPET R, SAINTILLAN D. Concentration instability of sedimenting spheres in a second-order fluid [J]. *Physics of Fluids*,2012, 24(7).
- [43] KAUZLARIC D, GREINER A, KORVINK J G. A non-local extension of the Phillips model for shear induced particle migration [J]. *Microsystem Technologies*, 2011, 17(2):265-272.
- [44] SIQUEIRA I D, CARVALHO M. Shear-induced particle migration in the flow of particle suspensions through a sudden plane expansion[J]. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences & Engineering*, 2018, 40(4):228.
- [45] SULLIVAN M T, MOORE K, STONE H A. Transverse instability of bubbles in viscoelastic channel flows[J]. *Physical Review Letters*, 2008.
- [46] QI Q M, SHAQFEH E. Theory to predict particle migration and margination in the pressure-driven channel flow of blood[J]. *Physical Review Fluids*, 2017, 2(9).
- [47] QIAN Y, KAWASHIMA S. Flow onset of fresh mortars in rheometers: Contribution of paste deflocculation and sand particle migration[J]. *Cement and Concrete Research*, 2016, 90:97-103.
- [48] 李俊宏. 微通道中高浓度悬浮液流动及颗粒分布的 CFD 模拟[D]. 重庆:重庆大学,2014.
- [49] OMAR S, HO JOON Y. Experimental study of bubble flow behavior during flow instability under uniform and non-uniform transverse heat distribution [J]. *Nuclear Engineering and Technology*,2020, 52(prepublish).
- [50] CORSEST M S, KIM Y J, JANG K P. Effect of the coarse aggregate size on pipe flow of pumped concrete[J]. *Construction Building Materials*, 2014, 66:723-730.
- [51] FARRIS R. Prediction of the viscosity of multimodal suspensions from unimodal viscosity data[J]. *Transaction Society Rheology*, 1968, 12(2):281-301.
- [52] ROUSSEL N. Steady and transient flow behaviour of fresh cement pastes[J]. *Cement & Concrete Research*, 2005, 35(9):1656-1664.
- [53] KIM D K, HYUN J Y, KIM S C, et al. Inertial effects on cylindrical particle migration in linear shear flow near a wall [J]. *Microfluidics and Nanofluidics*, 2016, 20(5):1-10.
- [54] DRIJER I, VAN D L T, VOLLEBREGT H M, et al. From highly specialised to generally available modelling of shear induced particle migration for flow segregation based separation technology[J]. *Separation and Purification Technology*, 2018, 192:99-109.
- [55] D'AVINO G, GRECO F, MAFFETTONE P L. Particle migration due to viscoelasticity of the suspending liquid and its relevance in microfluidic devices [J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2017, 49(1):341-360.
- [56] SIQUEIRA I R, MENDES P. On the pressure-driven flow of suspensions: particle migration in apparent yield-stress fluids [J]. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 2019, 265.
- [57] WANG J, JUAN M, YANG S, et al. Experimental investigation of the vibration reduction of the pipeline system with a particle impact damper under random excitation[J]. *Applied Sciences*,2023, 13(1).
- [58] RICHTER S M, SEVICK-MURACA E M. Characterization of concentrated colloidal suspensions using time-de-

- pendent photon migration measurements [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2000, 172(1).
- [59] COLBOURNE A A, BLYTHE T W, BARUA R, et al. Validation of a low field Rheo-NMR instrument and application to shear-induced migration of suspended non-colloidal particles in couette flow [J]. *Journal of Magnetic Resonance*, 2018, 286:30–35.
- [60] RONALD J, PHILLIPS, ROBERT C. et al. A constitutive equation for concentrated suspensions that accounts for shear-induced particle migration [J]. *Physics of Fluids A*, 1992, 4(1).
- [61] DBOUK T, LEMAIRE E, LOBRY L. Shear-induced particle migration: Predictions from experimental evaluation of the particle stress tensor [J]. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 2013, 198.
- [62] JEFFREY M, FABIENNE B. Curvilinear flows of non-colloidal suspensions: The role of normal stresses [J]. *Journal of Rheology*, 1999, 43(5).
- [63] DREW D A, PASSMAN S L. Theory of multicomponent fluids volume 135 || classical theory of solutions [J]. *Applied Mathematical Sciences*, 1999, 10:59–61.

Research on Particle Migration Behavior During Paste Slurry Pipeline Transportation

WANG Hui¹, DUAN Wenquan¹, LIU Jingzhi¹, MA Junsheng¹, GUO Qilin¹, GUO Shilei¹,
ZHAO Haiping^{1,2}, HAO Cheng¹

(1. Norin Mining Limited, Beijing 100053, China;

2. Management Committee of Zhongguancun Science Park's Xicheng Park, Postdoctoral Programme,
Norin Mining Limited Branch, Beijing 100053, China)

Abstract: In this paper, by analyzing the external force of flow field and the force between particles, the mechanical causes of particle migration behavior during pipeline transportation of suspension system are summarized, the influencing factors of particle migration behavior are analyzed, and the particle migration models with different particle sizes based on mechanical mechanism are summarized. The external forces of the flow field on the particles during pipeline transportation include gravity, viscous force, buoyancy, Saffman lift, Magnus lift, etc. The inter-particle forces include van der Waals force, electrostatic force, liquid bridge force, friction force and collision force. Under the combined action of the external force of the flow field and the inter-particle force, the particles in the shear zone of the pipe wall migrate to the plunger flow zone in the center of the pipe, and the fine particles in the center of the pipe migrate to the vicinity of the pipe wall. The research in this paper can clarify the internal mechanism of the formation of plunger flow structure and side wall slip layer in the current paste filling pipeline transportation process, and provide theoretical guidance for the mine paste filling process.

Key words: paste backfill; pipeline transportation; particle migration; mechanical action mechanism