基于ERT的全尾砂膏体管输过程中颗粒迁移行为研究*

王辉[1],刘云峰[1],冯兴亮[1],刘佳鹏[1],杨思敏[1],赵俊波[1],赵海平[1,2],李旭[1]

(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:为研究全尾砂膏体料浆管道输送过程中颗粒迁移规律与沉降行为的竞争机制,采用电阻层析成像技术(ERT),对质量浓度为60%、粗颗粒掺量分别为0、5%、10%、15%的膏体料浆开展管道输送试验。基于麦克斯韦方程建立电导率-质量浓度映射模型,通过电导率分布重构柱塞流结构,建立柱塞区质量浓度与粗颗粒掺量的回归方程。结果表明:管道中心区域的电导率与料浆质量浓度均高于边壁区域,颗粒迁移行为形成典型柱塞流结构,且随着粗颗粒掺量的增加,存在粗颗粒掺量"最优点"(4.3%)和"平衡点"(9.6%)。当粗颗粒掺量为4.3%时,颗粒迁移效果最优,形成"细颗粒承载、粗颗粒被载"的稳定颗粒结构流;当粗颗粒掺量超过9.6%后,沉降作用开始占据主导,管道底部颗粒堆积显著增加。ERT技术成功实现了膏体管输浓度场动态可视化,揭示了颗粒迁移-沉降的动态平衡规律,提升了"柱塞结构"稳定性并降低了堵管风险,对膏体充填安全输送具有参考价值。

关键词:全尾砂膏体料浆;管道输送;电阻层析成像技术;颗粒迁移;沉降行为

中图分类号:TD853.34 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)01-0108-09

Research on Particle Migration Behavior During Pipeline Transportation of Unclassified Tailings Paste Based on ERT

WANG Hui[1], *LIU Yunfeng*[1], *FENG Xingliang*[1], *LIU Jiapeng*[1],
YANG Simin[1], *ZHAO Junbo*[1], *ZHAO Haiping*[1,2], *LI Xu*[1]

(1.Norin Minging Co., Ltd., Beijing 100053, China;
2. Branch of Norin Mining Co., Ltd., Postdoctoral Scientific Research Workstation,
Management Committee of Zhongguancun Science Park's Xicheng Park, Beijing 100053, China)

Abstract: In order to study the competition mechanism of particle migration and settlement behavior in the process of pipeline transportation of unclassified tailings paste slurry, Electrical Resistance Tomography (ERT) was used to carry out pipeline transportation tests on paste slurry with mass concentration of 60% and coarse particle content of 0, 5%, 10% and 15%, respectively. Based on the Maxwell equation, the conductivity-mass concentration mapping model was established. The plunger flow structure was reconstructed by the conductivity distribution, and the regression equation of the mass concentration and the coarse particle content in the plunger area was established. The results show that the conductivity and slurry mass concentration in the central area of the pipeline are higher than those in the side wall area, and the particle migration behavior forms a typical plunger flow structure. With the increase of coarse particle content, there are "optimal point" (4.3%) and "equilibrium point" (9.6%) of coarse particle content. When the content of coarse particles is 4.3%, the particle migration effect is the best, forming a stable particle structure flow of "fine particles carrying coarse particles". When the content of coarse particles exceeds 9.6%, the settlement effect begins to dominate, and the accumulation of particles at the bottom of the pipeline increases significantly. The ERT technology has successfully realized the dynamic visualization of the concentration field of paste pipeline transportation, revealed the dynamic balance law of particle migration-settlement, improved the stability of "plunger structure" and reduced the risk of plugging, which has a reference value for the safe transportation of paste filling.

Key words: Unclassified tailings paste slurry, Pipeline transportation, Electrical resistance tomography, Particle migration, Settlement behavior

* **收稿日期**:2025-02-16
作者简介:王辉(1998—),男,甘肃陇南人,硕士,助理工程师,主要从事矿山开采相关工作。E-mail:18811722870@163.com

0 引言

膏体充填技术凭借卓越的安全性能、显著的经济优势以及对国家环保发展需求的高度契合,已被广泛应用于矿山开采过程中尾矿库和采空区的治理当中,是未来矿山生产发展的主要方向[1-2]。然而,在实际矿山充填作业中,尾砂物料存在粒径分布广、颗粒级配复杂,细颗粒含量高的特点[3],经过浓密、搅拌等关键环节处理后,会形成以水为基底、承载离散颗粒的悬浮液体系,从而影响料浆管输效果。由此可见,管道输送直接关系到膏体充填的效率和质量,决定着膏体充填工艺的整体进程[4]。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因素[5]。

膏体料浆管道输送涉及到流体力学、机械动力学、颗粒流等多个领域,输送过程中尾砂颗粒会受到复杂的力学作用,促使粗尾砂颗粒从管壁向剪切速率较低的区域(管道中心)迁移,水和较细的颗粒则向管道壁面迁移,形成相应的柱塞结构[6],显著影响管内料浆的流动行为和流变特性[7]。颗粒迁移行为促使管道中心区域固相含量增加,此时尾砂颗粒发生直接接触,颗粒间的相互作用显著增强,进而导致颗粒间的受力行为变得极其复杂[8]。当细尾砂颗粒向管壁迁移时,膏体料浆在管壁附近形成滑移层,该滑移层宏观上表现为 1~5 mm 厚的纯细膏体料浆[9],此时管输实际阻力与理论均质料浆阻力存在差异,导致管道输送过程中出现不稳定流现象[10]。

针对非牛顿黏弹性流体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[11]多个领域,但未形成统一的颗粒迁移机制认识。此外,实际膏体充填料浆在输送过程中,是以细颗粒与水为载体、承载粗颗粒的悬浮体系,但对细颗粒承载机制仍未明晰[12]。此外,充填管道具有非透明性,而且深埋于地下环境中,进一步增大了充填料浆颗粒迁移行为的研究难度。

因此,进行充填管道的"可视化检测技术"研究成为了目前的重要方向[13]。电阻层析成像技术(electrical resistance tomography,ERT)因具有非侵入[14]、原位[15]、在线实时监测等优点,成为悬浮液体系检测的首选方法[16],可通过图像重建算法实现流体流型的精准识别和固相含率的定量表征[17-18]。

本文拟通过 ERT 系统监测质量浓度为 60%,粗颗粒掺量为 0(纯细膏体料浆)、5%、10%、15%的膏体料浆输送时的流动行为,基于膏体料浆管输过程中的电导率、质量浓度变化情况,实现对管输过程中颗粒迁移行为的定量表征,得到不同粗颗粒掺量条件下膏体料浆输送过程中颗粒迁移行为与沉降行为的强弱关系,为管输过程中形成的"细颗粒承载,粗颗粒被载"的颗粒结构流提供试验支撑。研究结果对保证膏体料浆的稳定输送具有重要意义。

1 基于 ERT 的水平管道输送试验

1.1 试验尾砂

采用某矿山的尾砂作为试验材料,根据相关级配理论,将 150 μm 以上的尾砂作为粗颗粒,对 150 μm 以下的细尾砂用激光粒度仪测其粒径分布,结果如图 1 所示。

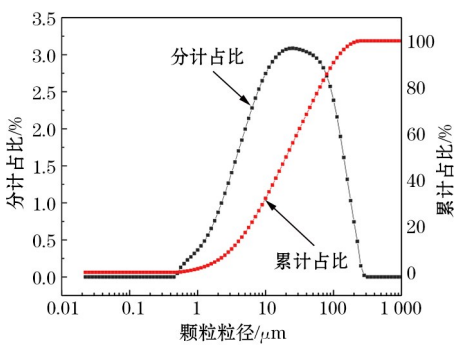


图 1 150 μm 以下尾砂粒级分布

Fig.1 Distribution of tailings particle size below 150 μm

150 μm 以下尾砂颗粒的不均匀系数 C_u 为 9.34,表明尾砂级配良好,粒径分布均匀。曲率系数 C_c 为 1.08,表明尾砂粒径分布的连续性较好。

150 μm 以上粗颗粒尾砂的粒级分布如图 2 所示。

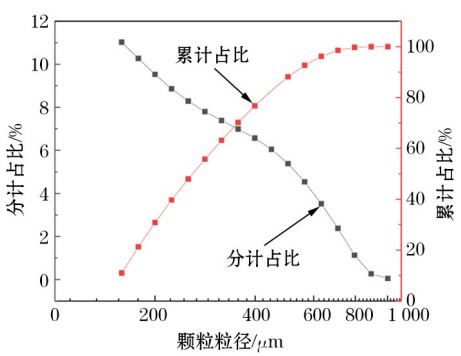


图 2 150 μm 以上尾砂粒级分布

Fig.2 Distribution of tailings particle size above 150 μm

150 μm 以上粗尾砂的不均匀系数 C_u 为1.97，表明粒径分布不均匀；曲率系数 C_c 为 0.82，表明尾砂粒径分布的连续性较差。

1.2 ERT 管输试验系统构成

ERT 系统由传感器单元[19]、测量与数据采集单元、图像重建单元三部分组成[20]，其基本测量原理如图 3 所示。

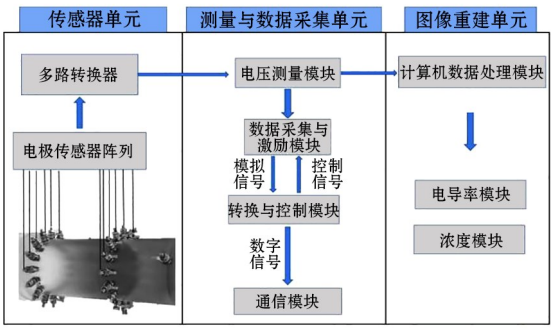


图 3 ERT 系统组成单元

Fig.3 ERT system units

ERT 传感器单元利用均匀排列在管道内壁的电极片，测定流场区域的电压。该传感器采用圆形结构设计，配置 16 个电极，呈双平面阵列排布，电极为不锈钢螺栓。螺栓的公称直径为 3 mm，螺距为 0.5 mm，内径为 3.11 mm，底孔直径为 3.1 mm，电极片尺寸为 4 mm×8 mm。

测量与数据采集单元是 ERT 系统的重要组成部分，数字信号可反映管道内电导率的分布情况。为准确得到料浆在管输过程中的变化情况，采用 V5R 数据采集系统，其精度高达 625 帧/s。

图像重建单元则是利用数据重建功能获得料浆的相关参数。利用麦克斯韦方程得到料浆电导率与质量浓度的变化关系[21]。

$$\varphi=\frac{2\sigma_1+\sigma_2-2\sigma_{mix}-\dfrac{\sigma_{mix}\sigma_2}{\sigma_1}}{\sigma_{mix}-\dfrac{\sigma_{mix}\sigma_2}{\sigma_1}+2(\sigma_1-\sigma_2)} \tag{1}$$

式中：σ_1 为连续相导电性，ms/cm；σ_2 为分散相电导率，ms/cm；σ_{mix} 为图像重建电导率，ms/cm；φ 为料浆质量浓度，%。

在实际试验中，为确保结果的准确性，管道内的传感器必须完全充满水，并对其进行在线参考点校准[22]。

料浆输送的动态检测试验平台由料浆储存装置、管道、ERT 检测系统、阀门等部分构成[23]，输送管道是内径为 5 cm 的亚克力圆管。

基于电阻层析成像的管输系统，一方面可以实时得到管道输送过程中料浆的流动状态，获取料浆电导率、质量浓度、流态分布变化规律；另一方面，该装置使用法兰装置，可实现管输系统充填倍线的动态变化，以满足不同的管输需求。使用的水平管道长度为 1.2 m，固定于试验支架上。

1.3 管道输送试验方案及过程

首先，将 ERT 系统安装在试验管道上，打开数据采集软件，并配置好相关软件参数；其次，根据预试验，确定单次料浆质量为 50 kg，按照实际料浆质量浓度与粗颗粒掺量配比确定粗细尾砂与水的质量，并将其搅拌 3 min 至均匀状态；然后，关闭水平管线的开关阀，将制备好的料浆导入储料池，待料浆充满管道内时，进行参考电压标定，再打开水平管道的阀门，记录水平管管输过程中料浆的变化情况；最后，排净管道内残留料浆，并用清水冲洗管道内壁。

2 试验结果及分析

2.1 电导率变化分析

尾砂颗粒从选厂排出后，会在其表面附着游离的 Ca^{2+}、Mg^{2+}、Al^{3+}、Fe^{3+} 等重金属离子，因此，新制备的膏体料浆中，重金属离子会从不导电的尾砂颗粒表面逐渐溶解于水溶液中，进而提高整个料浆体系的电导率值。不同阶段的电导率变化如图 4 所示，其中，以纯细膏体料浆为例，p_1 平面、p_2 平面分别代表传感器的两个检测平面。

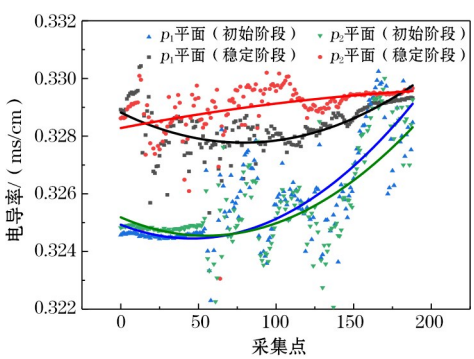
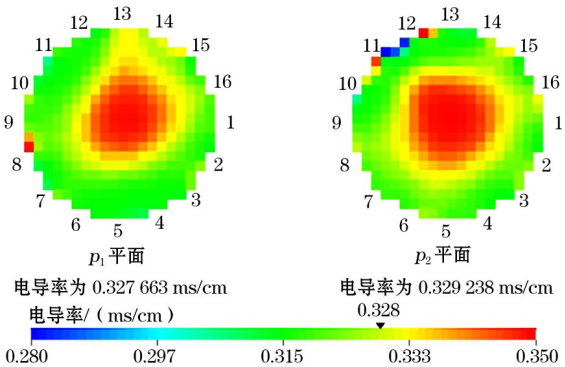


图 4 膏体料浆在不同阶段的电导率变化

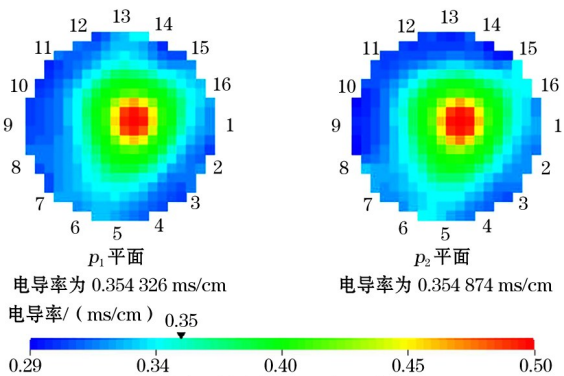
Fig.4 The conductivity changes of paste slurry in different stages

由图 4 可知，随着管道输送的进行，料浆电导率整体升高；当尾砂颗粒表面附着的金属离子完全溶解于水溶液中，其电导率基本保持稳定。电导率值由起始的 0.325 ms/cm 升高为稳定阶段的 0.330 ms/cm 左右。

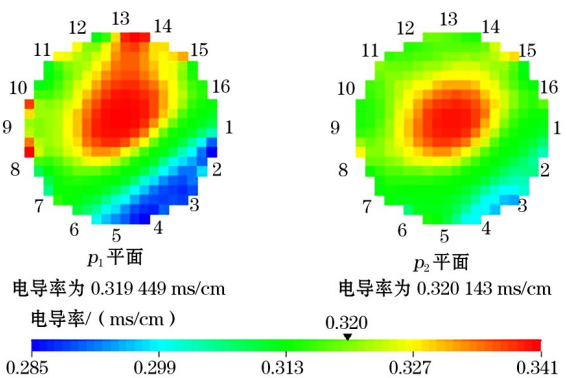
质量浓度为 60%,粗颗粒掺量为 0、5%、10%、15%的膏体料浆在输送过程中电的导率变化情况如图 5 所示,可见,由于粗尾砂颗粒的添加量不同,料浆流动行为存在差异。



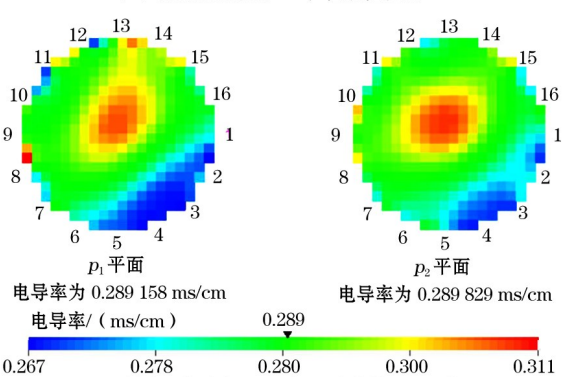
(a) 料浆质量浓度 60%,粗颗粒掺量 0



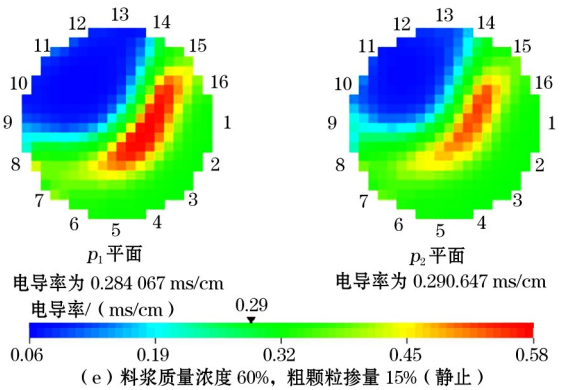
(b) 料浆质量浓度 60%,粗颗粒掺量 5%



(c) 料浆质量浓度 60%,粗颗粒掺量 10%



(d) 料浆质量浓度 60%,粗颗粒掺量 15%(流动)



(e) 料浆质量浓度 60%,粗颗粒掺量 15%(静止)

图 5 不同粗颗粒掺量料浆电导率变化切片

Fig.5 slicing of electvical conductivity change of slurry with different contents of coarse particles

管道内料浆输送时会形成柱塞结构,而处于柱塞区和剪切区的膏体料浆的电导率差异较大。基于上述不同粗颗粒掺量的膏体料浆输送时的电导率切片图,管道中心高电导率区域为柱塞区,边壁附近低电导率区域为剪切区,根据电导率区域面积占比变化可知,随着粗颗粒掺量的增加,管道内柱塞区域逐渐减小。粗颗粒含量较低时,管输过程中粗颗粒向管道中心迁移,柱塞区面积增大;随着膏体料浆粗颗粒掺量增加,粗颗粒的沉降作用强于迁移作用,导致相应的柱塞区逐渐减小。

纯细膏体料浆输送时管道内柱塞区和剪切区电导率的变化情况如图 6 所示,图中"p 剪切区"代表剪切区电导率变化,"p 柱塞区"代表柱塞区电导率变化。

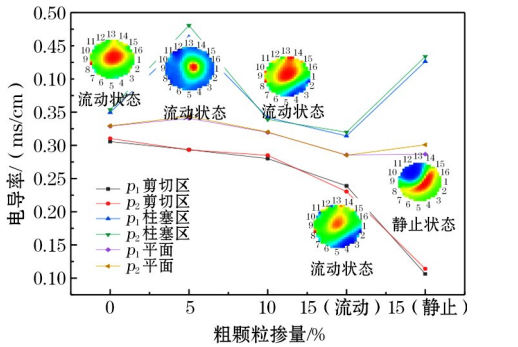


图 6 膏体料浆电导率随粗颗粒掺量的变化情况

Fig.6 The change of electrical conductivity of paste slurry with the content of coarse particles

由图 6 可知,纯细膏体料浆输送过程中,料浆整体电导率为 0.328 ms/cm,柱塞区料浆电导率为 0.35 ms/cm,剪切区料浆电导率为 0.30 ms/cm;当粗颗粒掺量为 5%时,料浆整体电导率为 0.35 ms/cm,柱塞区料浆电导率为 0.47 ms/cm,剪切区

料浆电导率为 0.30 ms/cm;粗颗粒掺量为 10%时,料浆整体电导率为 0.32 ms/cm,柱塞区料浆电导率为 0.34 ms/cm,剪切区料浆电导率为 0.28 ms/cm;当粗颗粒掺量为 15%时,料浆输送时整体电导率为 0.29 ms/cm,柱塞区料浆电导率为 0.31 ms/cm,剪切区料浆电导率为 0.25 ms/cm;料浆静止时,柱塞区料浆电导率为 0.42 ms/cm,剪切区料浆电导率为 0.11 ms/cm。

随着粗颗粒掺量的增加,管输过程中柱塞区料浆电导率先增大后减小。相比于纯细膏体料浆,粗颗粒掺量为 5%时,管道内柱塞区料浆电导率增大 0.12 ms/cm,粗颗粒掺量为 10%时管道内柱塞区料浆电导率减少 0.01 ms/cm,粗颗粒掺量 15%时,管道内柱塞区料浆电导率减少 0.04 ms/cm。从电导率的变化量分析,粗颗粒掺量为 5%时有利于管道内料浆流动,粗颗粒掺量为 10%和 15%时不利于料浆流动。当粗颗粒掺量为 15%的料浆静止后,柱塞区料浆电导率急剧增大到 0.42 ms/cm,剪切区料浆电导率下降到 0.11 ms/cm,静止状态下不导电的粗尾砂颗粒快速沉降在剪切区底部,颗粒间相互挤压,将料浆中的细颗粒和水挤入管道中央,导致剪切区料浆电导率降低,柱塞区料浆电导率急剧增大。

为进一步研究输送过程中各区域膏体料浆电导率的变化,将管道划分为 13 个区域(见图 7),其中编号为 9、10、11、12 的单元所组成的各方形区域的边长为2.5 cm。

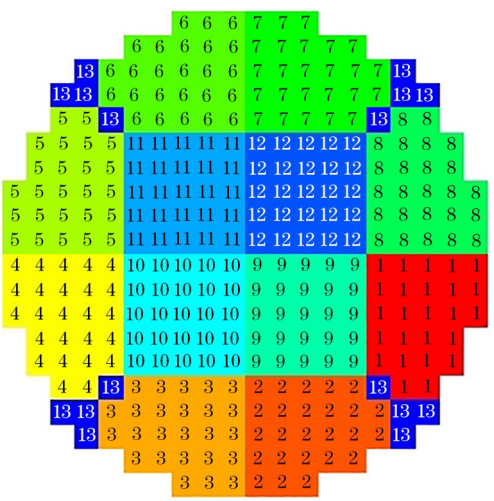
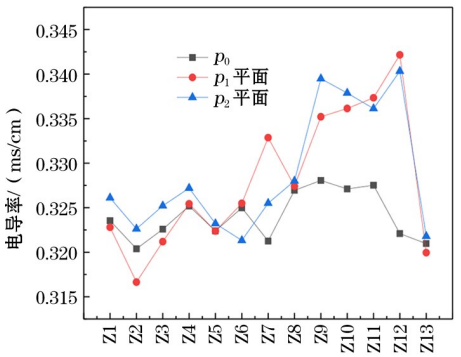


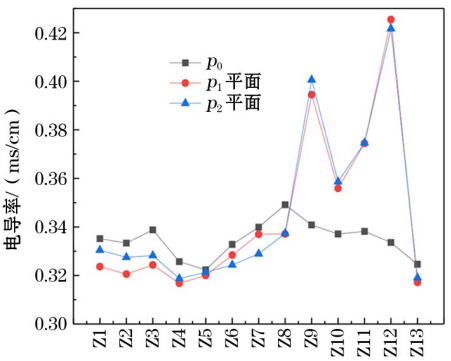
图 7 管道区域划分

Fig.7 Division of pipeline area

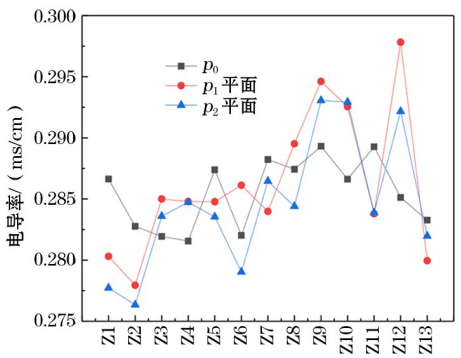
基于上述管道区域划分规则,分析不同粗颗粒掺量的膏体料浆输送过程中各区域电导率的变化,如图 8 所示,其中,p_0 表示初始时刻料浆的电导率。



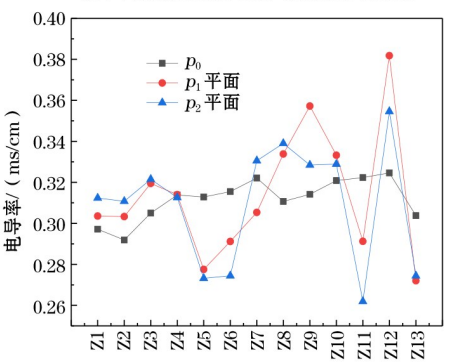
(a) 料浆质量浓度 60%,粗颗粒掺量 0



(b) 料浆质量浓度 60%,粗颗粒掺量 5%



(c) 料浆质量浓度 60%,粗颗粒掺量 10%



(d) 料浆质量浓度 60%,粗颗粒掺量 15%

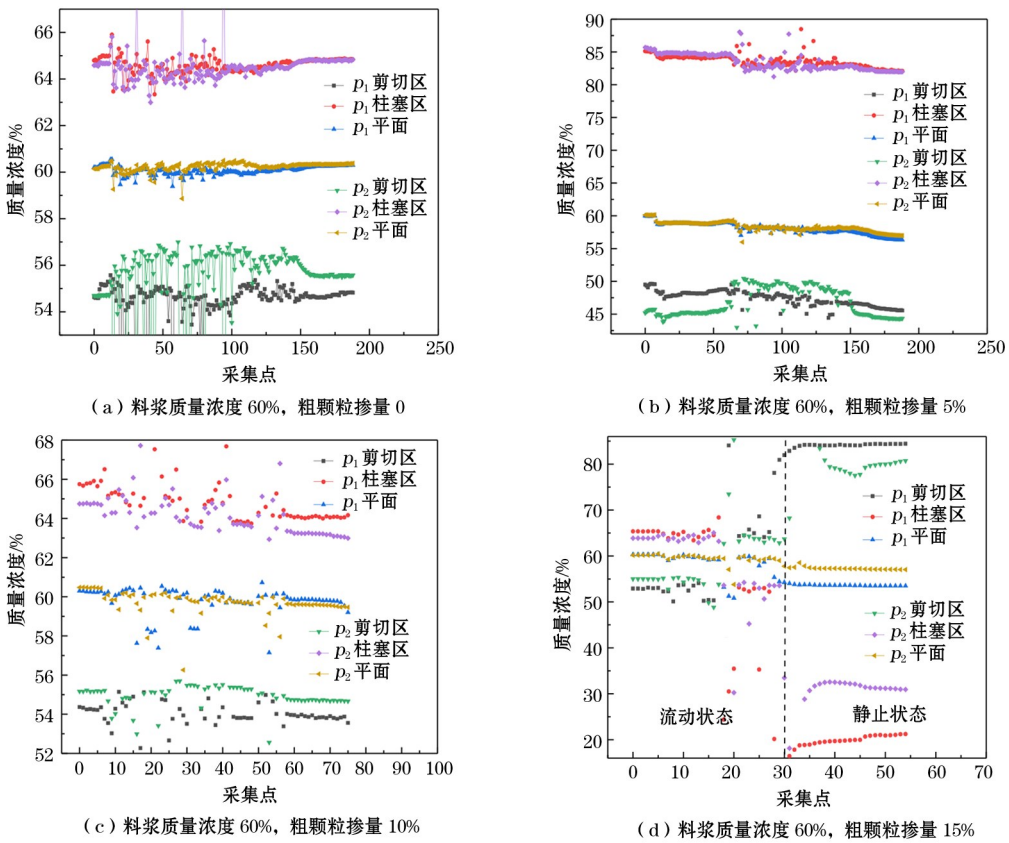
图 8 不同粗颗粒掺量料浆不同区域的电导率变化

Fig.8 The conductivity change of slurry with different contents of coarse particles in different legions

由图 8 可知,纯细膏体料浆输送过程中,初始状态的电导率基本维持在 0.325 ms/cm,形成柱塞区的直径为 2.22 cm,此时 p_1、p_2 平面内编号为 9、10、11、12 区域内其料浆整体电导率为 0.342 ms/cm,略大于其余区域的电导率;当粗颗粒掺量为 5%时,初始状态料浆整体电导率为 0.34 ms/cm,形成柱塞区的直径为 2.57 cm;当粗颗粒掺量为 10%与 15%时,柱塞区直径仅为 1.9 cm 和 1.23 cm,说明粗颗粒掺量越高,料浆管输的稳定性越差。

2.2 料浆质量浓度变化

ERT 系统的数据采集单元不仅能监测料浆电导率的变化,还能实时反映料浆质量浓度的变化规律[24-26]。以管输过程中料浆质量浓度为评价指标,能更直观地监测膏体料浆管输过程的变化情况。不同粗颗粒掺量料浆的质量浓度变化如图 9 所示。



(a) 料浆质量浓度 60%,粗颗粒掺量 0　(b) 料浆质量浓度 60%,粗颗粒掺量 5%

(c) 料浆质量浓度 60%,粗颗粒掺量 10%　(d) 料浆质量浓度 60%,粗颗粒掺量 15%

图 9　不同粗颗粒掺量料浆质量浓度变化

Fig.9　Changes of mass concentration of slurry with different contents of coarse particles

由图 9 可知,纯细膏体料浆输送过程中,柱塞区料浆质量浓度为 64.5%,剪切区料浆质量浓度为 55%;粗颗粒掺量为 5%时,输送过程中柱塞区料浆质量浓度为 83.6%,剪切区料浆质量浓度为 45.6%;粗颗粒掺量为 10%时,输送过程中柱塞区料浆质量浓度为 63.7%,剪切区料浆质量浓度为 49.85%;粗颗粒掺量为 15%时,输送过程中柱塞区料浆质量浓度为 63.3%,剪切区料浆质量浓度为 52.4%。当粗颗粒掺量为 15%的膏体料浆处于静止状态时,剪切区料浆质量浓度达到 85%,柱塞区料浆质量浓度仅为 20%左右。

结合料浆质量浓度的变化情况,绘制不同粗颗粒掺量下不同区域的膏体料浆质量浓度变化情况,如图 10 所示。

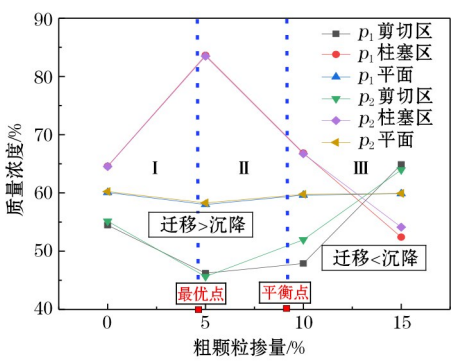


图 10　不同粗颗粒掺量料浆在不同区域的质量浓度变化

Fig.10　Changes of mass concentration of surry with different contents of coarse particles in different legions

通过分析不同粗颗粒掺量的膏体料浆输送过程中质量浓度变化情况,可以发现随着粗颗粒掺量的增加,柱塞区料浆质量浓度先增大后减小。当粗颗粒掺量为 0 时,柱塞区料浆质量浓度为 64.5%;当粗颗粒掺量为 5%时,柱塞区料浆质量浓度为 83.6%,增大了 19.1 个百分点;当粗颗粒掺量为 10%时,相比于纯细膏体料浆,柱塞区料浆质量浓度减少了 0.8 个百分点;当粗颗粒掺量为 15%时,相比于纯细膏体料浆,柱塞区料浆质量浓度减少了 12.1 个百分点。可将上述粗颗粒范围分为 3 个区域,分别为区域Ⅰ、区域Ⅱ和区域Ⅲ,区域Ⅰ内添加的粗尾砂颗粒能促进颗粒迁移行为,但促进幅度不断增加。在区域Ⅱ内添加的粗尾砂颗粒能促进颗粒迁移行为,且促进幅度逐渐减弱;因此在区域Ⅰ和区域Ⅱ之间存在最优掺量点。区域Ⅲ内添加的粗尾砂颗粒能抑制颗粒迁移行为,表明在区域Ⅱ和区域Ⅲ之间存在平衡掺量点,此时迁移行为效应与沉降行为相平衡。

2.3 颗粒迁移行为分析

膏体料浆在水平管道输送时,尾砂颗粒会发生径向迁移及沉降行为。根据管输过程中料浆电导率与质量浓度的变化规律,可以分析尾砂颗粒迁移行为与沉降行为的相对关系。

随着粗颗粒掺量增加,膏体料浆管输过程中颗粒迁移行为先增大后减小。当粗颗粒掺量为 5%时,柱塞区面积占比增大,该区域料浆的电导率增高,质量浓度接近 84%,说明适量的粗颗粒能促进颗粒迁移行为。此时粗颗粒迁移至柱塞区,细颗粒间相互堆积,形成具有一定承载能力的结构体,实现“细颗粒承载,粗颗粒被载”的稳定颗粒结构流,粗尾砂颗粒无沉降,能保持膏体料浆的稳定输送,柱塞区料浆质量浓度也接近最大堆积质量浓度,因此迁移效果最佳的粗颗粒掺量为 5%。当粗颗粒掺量增至 10%时,柱塞区面积占比减小,该区域料浆的电导率和质量浓度降低,说明此粗颗粒掺量下膏体料浆管输时的沉降行为已逐渐强于颗粒迁移行为,此时颗粒流结构“强度”不足以支撑粗颗粒稳定输送,在剪切区底部开始出现粗颗粒堆积。由此可判断,在粗颗粒掺量为 5%~10%时,存在粗颗粒掺量的“平衡点”,可实现管输过程中颗粒迁移能力与沉降作用的相互抵消。当粗颗粒掺量达到 15%时,由于粗颗粒掺量过高,料浆输送过程中形成的柱塞区面积占比急剧减小,该区域料浆的电导率和质量浓度大幅降低,颗粒沉降行为远大于迁移能力;且该掺量下的料浆静止时,粗颗粒剧烈沉降,导致柱塞区质量浓度降至 20%,剪切区质量浓度急剧增加到 85%,导致大量粗颗粒堆积在管壁附近,此时膏体料浆已不适合进行管道输送。

为进一步分析管道输送时颗粒迁移行为引起的柱塞区料浆质量浓度与粗颗粒掺量之间的关系,对上述柱塞区质量浓度与粗颗粒掺量之间的关系进行拟合,拟合曲线如图 11。

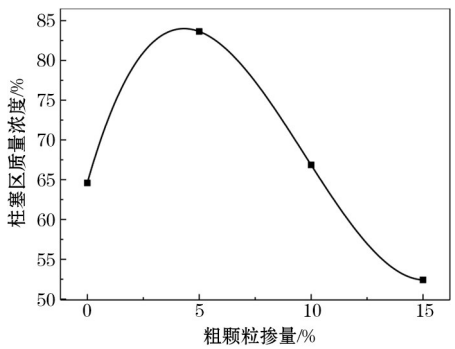


图 11 柱塞区质量浓度与粗颗粒掺量的关系曲线

Fig.11 Relationship curve between mass concentration and coarse particle content in plunger area

回归方程为:

$$\varphi=0.64+9.93C_P-147.90C_P^2+508.50C_P^3 \quad (2)$$

式中:φ 为柱塞区料浆质量浓度,%;C_P 为粗颗粒掺量,%。

对上述回归方程进行求导,得到相应的两个解,分别为 $C_{P_1}=4.3\%$,$C_{P_2}=15.1\%$。即当粗颗粒掺量 $C_{P_1}=4.3\%$时,膏体料浆迁移效果达到最优状态,与试验分析得到的最优掺量 5%接近,验证了回归方程的准确性。当粗颗粒掺量 $C_{P_2}=15.1\%$时,膏体料浆在实际管输中极易发生颗粒沉降,与试验中“15%掺量不适合管道输送”的结论一致。方程对称轴 $C_P=9.6\%$为粗颗粒掺量的“平衡点”,即当粗颗粒掺量处于 4.3%~9.6%区间时,颗粒迁移能力强于沉降作用;与粗颗粒掺量处于 9.6%~15.1%区间时,颗粒沉降作用强于迁移能力,与试验得到的粗颗粒掺量在 10%~15%之间存在平衡点的规律一致。

3 结论

本文通过 ERT 系统检测不同粗颗粒掺量下膏体料浆的管道输送过程,基于不同管道区域内料浆电导率和质量浓度的变化情况,分析了流动诱导下颗粒的迁移行为,得到如下主要结论。

(1) 膏体料浆输送时会形成柱塞结构,柱塞区

大小可以反映管道输送的稳定性。随着粗尾砂颗粒掺量增加,柱塞区面积占比先增大后减小,该区域的电导率和料浆质量浓度同样呈先增大后减小的变化趋势。

(2) 对管道输送时柱塞区料浆质量浓度与粗颗粒掺量之间的关系进行拟合分析,得到回归方程为 $\varphi=0.64+9.93C_P-147.90C_P^2+508.50C_P^3$。随着粗颗粒掺量增加,膏体料浆管输过程中颗粒迁移行为先增强后减弱,掺量"最优点"为 4.3%,此时膏体料浆管输中的迁移效果最佳,掺量"平衡点"为 9.6%,此时管输时颗粒迁移能力与沉降作用相互抵消。

(3) 料浆中粗颗粒掺量最优时,细颗粒间相互堆积,形成具有一定承载能力的结构体,实现"细颗粒承载,粗颗粒被载"的稳定颗粒结构流,从而可保证膏体料浆的稳定输送。

参考文献(References):

[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.
WU Aixiang, WANG Hongjiang. Theory and technology of metal mine paste backfilling [M]. Beijing: Science Press,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.
YU Nanzhong. Green mining and paste backfilling[J]. Nonferrous Metals Design,2016,43(1):1-5.

[3] 杨天雨.膏体管道输送边界层效应及阻力特性[D].昆明:昆明理工大学,2021.
YANG Tianyu. Boundary layer effect and resistance characteristics of pipeline transportation of paste [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology,2021.

[4] 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.
YAN Bingheng, LI Cuiping, WU Aixiang, et al. Analysis of law of movement of coarse aggregate particles inpipeline transportation of paste [J]. Journal of Central South University (Science and Technology),2019,50(1):172-179.

[5] 刘伟涛,王莹莹,王国立.基于小型环管试验的膏体管道输送阻力特性研究[J].矿业研究与开发,2023,43(9):12-16.
LIU Weitao, WANG Yingying, WANG Guoli. Study on resistance characteristics of paste pipeline transportation based on small-scale loop pipe test[J]. Mining Research and Development,2023,43(9):12-16.

[6] ZADE S, COSTA P, FORNARI W, et al. Experimental investigation of turbulent suspensions of spherical particles in a squareduct[J]. Journal of Fluid Mechanics,2018,857:748-783.

[7] MAHAUT F, CHATEAU X, COUSSOT P, et al. Yield stress and elastic modulus of suspensions of noncolloidal particles in yield stress fluids[J]. Journal of Rheology,2008,52(1):287-313.

[8] 陈有轩,张志军.基于离散元法的颗粒-气泡间相互作用行为模拟研究[J].煤炭学报,2023,48(3):1403-1412.
CHEN Youxuan, ZHANG Zhijun. Simulation of particle-bubble interaction behavior based on discrete element method[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(3): 1403-1412.

[9] 杨天雨,乔登攀,邓涛,等.废石-尾砂胶结膏体料浆的压力泌水效应及管输边界层厚度估算[J].矿冶,2021,30(6):1-10.
YANG Tianyu, QIAO Dengpan, DENG Tao, et al. Pressure bleeding effect of waste rock tailings cement paste and estimation of thickness of pipeline transportation boundary layer[J]. Mining and Metallurgy, 2021, 30(6): 1-10.

[10] 文孝贵,段单峰.计算流体力学在充填料浆管道输送模拟分析的应用及研究发展方向[J].矿业研究与开发,2022,42(12):18-23.
WEN Xiaogui, DUAN Danfeng. Application and research trend of computational fluid dynamics in the pipeline transportation simulation of filling slurry [J]. Mining Research and Development,2022,42(12):18-23.

[11] YUAN D, ZHAP Q B, YAN S, et al. Recent progress of particle migration in viscoelastic fluid[J]. Lab on a Chip, 2018,18(4):551-567.

[12] ZHENG E Z, RUDMAN M, KUANG S B, et al. Turbulent coarse-particle non-newtonian suspension flow in a pipe[J]. International Journal of Multiphase Flow,2021:103698.

[13] 王湃,李佳庆,李阳博,等.基于 ERT 的金属矿山充填管道堵塞可视化检测方法[J].中南大学学报(自然科学版),2022,53(2):643-652.
WANG Pai, LI Jiaqing, LI Yangbo, et al. Visual detection method of metal mine filling pipeline blockage based on ERT [J]. Journal of Central South University (Science and Technology),2022,53(2):643-652.

[14] WANG C, CAO Q Q, CHEN Y X, et al. Evaluation of parasitic resistance in voltage-driven electrical resistance tomography [J]. Measurement Science and Technology, 2020,31(5):055901.

[15] 谭超,董峰.多相流过程参数检测技术综述[J].自动化学报,2013,39(11):1923-1932.
TAN Chao, DONG Feng. Parameters measurement for multiphase flow process[J]. Acta Automatica Sinica,2013,39(11):1923-1932.

[16] WANG M. Industrial tomography: systems and applications [M]. Cambridge: Woodhead Publishing,2015:431-434.

[17] 陶芳芳,宁尚雷,靳海波.电阻层析成像技术在气液(固)多相流动体系中的应用进展[J].过程工程学报,2020,20(4):371-381.
TAO Fangfang, NING Shanglei, JIN Haibo. Application progress of electrical resistance tomography in gas-liquid-(solid) multiphase flow systems[J]. The Chinese Journal of Process Engineering,2020,20(4):371-381.

[18] 董峰,许燕斌.电阻层析成像技术在两相流测量中的应用[J].工程热物理学报,2006(5):791-794.
DONG Feng, XU Yanbin. Application of electrical resistance tomography in two-phase flow measurement[J]. Journal of Engineering Thermophysics,2006(5):791-794.

[19] 孙海亮,李彦龙,刘昌岭,等.电阻层析成像技术及其在水合物开采模拟实验中的应用[J].计量学报,2019,40(3):455-461.
SUN Hailiang, LI Yanlong, LIU Changling, et al. Electrical resistance tomography and the application in the simulation experiment of hydrate mining [J]. Acta Metrologica Sinica,2019,40(3):455-461.

[20] 崔自强,张倩,夏子涵,等.用于疏浚工程泥浆密度测量的电阻层析成像技术[J].传感技术学报,2021,34(3):291-296.
CUI Ziqiang, ZHANG Qian, XIA Zihan, et al. Electrical resistance tomography for slurry density measurement in dredging engineering[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators,2021,34(3):291-296.

[21] DYAKOWSKI T, JEANMEURE L F C, JAWORSKI A J. Application of electrical tomography for gas-solids and liquid-solids flows: a review[J]. Powder Technology,2000,112(3):174-192.

[22] HASHEMI S A, SPELAY R B, SANDERS R S, et al. A novel method to improve electrical resistance tomography measurements on slurries containing clays [J]. Flow Measurement and Instrumentation,2021,80:101973.

[23] 刘卓.基于ERT与无线传感网络技术的矿山充填管道可视化检测研究[D].西安:西安科技大学,2021.
LIU Zhuo. Research on the visualization detection of mine filing pipeline based on ERT and wireless sensor network technology[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology,2021.

[24] SHOOK C A, DANIEL S M, HOLGATE J A S P. Flow of suspensions in pipelines (Part 2: Two Mechanisms of Particle Suspension)[J]. The Canadian Journal of Chemical Engineering,1968,46(4):238-244.

[25] GILLIES R G, SHOOK C A. Concentration distributions of sand slurries in horizontal pipe flow[J]. Particulate Science & Technology,1994,12(1):45-69.

[26] KAUSHAL D R, TOMITA Y. Experimental investigation for near-wall lift of coarser particles in slurry pipeline using γ-ray densitometer[J]. Powder Technology,2007,172(3):177-187.