



海底开采高倍线强阻力充填料浆的输送

刘志祥, 肖思友, 王卫华, 李夕兵, 兰 明

(中南大学 资源与安全工程学院, 长沙 410083)

摘要:为解决三山岛金矿充填料浆管道输送过程中存在的高浓度、高倍线、强阻力等技术难题,对三山岛金矿充填料浆展开环管试验,研究高倍线强阻力条件下高浓度充填料浆的管道输送特性。通过测出不同灰沙比条件下不同质量浓度的充填料浆在不同输送速度下的压力损失以及不同停顿时间再次泵送时的启动阻力,得到充填料浆的流变特性。在充填料浆沉降实验和环管试验的基础上,结合非线性牛顿体管道输送理论和计算机流体动态数值分析方法对充填料浆的输送阻力和速度分布进行计算。结果表明:三山岛金矿充填系统采用内径为125 mm的陶瓷复合钢管作为输送管道,灰沙比1:4,质量浓度为72%~78%的充填料浆输送阻力低于5 MPa;随着料浆浓度的提高,其流变模型由屈服伪塑性体逐渐向宾汉体转变;灰沙比为1:10、质量分数为72%的充填料浆输送阻力大于9 MPa,料浆具有典型的固液二相流特征。

关键词:强阻力;泵送;环管实验;海底开采;流变特征;计算机流体动态

中图分类号: X753

文献标志码: A

三山岛金矿是我国第一座大型滨海硬岩金属矿山。其矿体厚大、成因复杂、远离陆岸、开采时间长且位于海底,控制岩层的变形和移动是海底安全开采的关键^[1]。充填采矿法因其高采出率、环保、安全等技术特征而成为海底金属矿山开采的首选方法^[2]。但海底开采对充填质量要求较高,在充填料浆输送过程中,存在着充填料浆浓度高、输送距离长、充填倍线高、输送阻力大等技术难题。

大量工程实践表明^[3-7],浓度为70%~78%、灰沙比为1:4~1:10的充填料浆在管径为108~133 mm、流量为(100±10) m³/h的输送条件下,适宜的自流输送倍线值为4~6,极限充填倍线值为9~10,此时料浆压力难以克服输送总阻力,依靠自身质量无法实现自流输送,须在输送系统设置增压泵进行输送。WHITE^[8]对粘性流体在管道中的输送规律进行了详细的探讨,并给出了多重管道输送管网参数设计的实验和理论分析方法。董慧珍等^[9]通过环管实验对质量浓度为80%、81%的充填料浆的管道输送阻力进行了研究。WANG等^[10]利用Fluent软件对深井煤矿自流输送充填系统中料浆的流动速度进行了优化研究。吴迪等^[11]基于CFD对固液二相流管道输送的压力损失和弯管部分的受力情况进行了分析,获得料浆输送的最佳浓度和流量。

杨建等^[12]利用Fluent软件计算了三相流态充填体管道输送速度和压力分布。张修香等^[13]利用Fluent软件计算了高浓度料浆管道输送压力损失和弯管处压力分布。

在实际工程中,由于采矿工艺的需要,同一套充填管道往往需要输送不同强度要求的充填料浆,而充填体强度受到灰沙比和料浆浓度的共同影响,因此,研究不同灰沙比条件下不同浓度料浆的管道输送特征对充填系统优化更具有指导意义。本文作者通过三山岛金矿尾砂充填料浆环管试验,测得不同配比料浆管道输送压力损失以及不同停顿时间再次泵送时的启动阻力,结合Fluent软件为高倍线强阻力管道输送系统最佳技术参数提供设计依据,并为同类型矿山充填管网设计提供借鉴经验。

1 实验

1.1 实验设备与材料

环管实验管路布置系统如图1所示,试验系统管路总长约150 m。根据试验现场的搅拌机的工作能力,选用一台搅拌机进行搅拌,设计要求制备充填料浆的

搅拌时间为 8~10 min, 为制备均匀、合格的充填料浆, 适当延长搅拌时间。尾砂环管试验输送泵选用 1 台 HBT90.21.200S 型混凝土泵, 最大理论输送量为 90 m³/h, 最大泵送压力为 18 MPa。环管泵送试验平台选用内径为 125 mm、管壁厚度为 δ 8 mm 的普通无缝钢管, 以及弯头若干, 配套管卡及胶圈若干。液压测试采用德国 Hydrotechnik 公司生产的 MultiSystem 5060 便携式测试仪, 如图 2 所示。

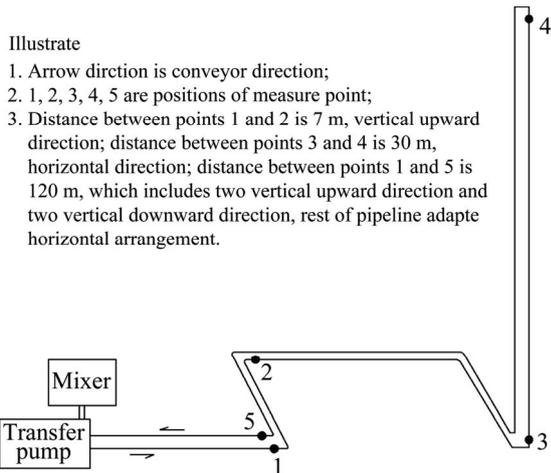


图 1 水平管道和垂直管道架设图

Fig. 1 Layout of pipeline transportation system



图 2 MultiSystem 5060 便携式测试仪

Fig. 2 MultiSystem 5060 portable tester

实验采用的充填骨料为三山岛金矿选厂经水力旋流器脱泥的分级尾砂, 尾砂不均匀系数为 5.9, 尾砂充填料颗粒较粗, 其粒径组成如表 1 所列。胶结料为散装 425 号水泥, 充填所需的水直接利用海水。泵送实验采用的料浆为灰砂比 1:4、浓度 78%和灰砂比 1:10、

表 1 三山岛新立矿区尾砂粒径组成

Table 1 Grain size distribution of tailings

| Grain size/mm | Cumulative distribution rate/% |
|---------------|--------------------------------|
| 0.042 | 10 |
| 0.14 | 30 |
| 0.21 | 50 |
| 0.49 | 90 |
| 0.96 | 95 |

浓度 72%的分级尾砂充填料浆。

1.2 实验方法

考虑到充填骨料的粒径较粗, 在环管实验之前设计一组沉降实验以测得充填材料在静止时的沉降速率, 实验结果如表 2 所列。由表 2 可知, 由于分级尾砂充填料颗粒较粗, 浓度为 72%的料浆在 5 min 之内发生很大的沉降, 沉降量在 10%以上, 说明粗尾砂颗粒容易在管道内沉降堆积, 导致堵管。为保证环管实验的顺利进行, 通过适当增加水泥的含量来改善充填料颗粒级配, 降低充填料浆的沉降量^[14]。基于上述分析设计两组环管实验:

1) 该组试验主要通过提高灰砂比来改善级配, 提高充填料浆的浓度, 使得充填料浆达到似膏体。首先制备灰砂比 1:4, 料浆浓度为 78%的充填料浆, 当充填料浆充满整个环管管道且保持混凝土泵料斗内料浆装满度在 70%以上时, 即停止制备充填料浆。待泵送稳定后, 先将输送速度调至 1.2 m/s, 测量各段的压力损失, 每次测量时间 5 min, 然后依次将输送速度调至 1.4、1.6、1.8、2.0 和 2.2 m/s。测完所需数据后, 进行停泵试验, 分别停泵 15、30 min, 然后重新启动, 测定启动时的阻力。测完所有数据后, 往泵料斗中加水将料浆浓度稀释至 72%后重新进行上述测量, 测完后清洗管道及设备。

2) 采用灰砂比 1:10, 质量浓度 72%的分级尾砂充填料浆来完成环管试验, 料浆输送速度为 2.0 m/s。由于料浆中水泥细颗粒含量较少, 容易沉降, 在进行第

表 2 不同浓度料浆的平均沉降量表(1 L)

Table 2 Sedimentation of backfilling slurry (1 L)

| Mass fraction/% | Sedimentation/mL | | |
|-----------------|------------------|--------|--------|
| | 5 min | 15 min | 25 min |
| 72 | 35 | 85 | 95 |
| 78 | 17.5 | 45 | 80 |

二组试验时只测量沿程阻力,中间不再停泵,以免造成堵管。

2 结果和分析

料浆灰沙比为 1:4、流速为 2.0 m/s 的输送压差图如图 3 所示。由图 3 可知,灰沙比为 1:4 的试验料浆在输送过程中,沿程阻力很小,可轻易输送,浓度为 78% 的充填料浆的输送阻力明显大于 72% 浓度的输送阻力,说明在相同灰沙比条件下,料浆的黏度随着质量浓度的增大而增大。

图 4 所示为停泵 15 min 之后的输送压差图。由图 4 可知,停泵 15 min 之后,实验料浆仍能稳定输送,但输送阻力分别增大了 2.67 倍和 3.24 倍,其中浓度为 78% 的充填料浆的压力损失明显大于浓度为 72% 的充填料浆的。随着停泵时间延长至 30 min,72% 浓度和 78% 浓度的充填料浆的输送阻力分别增大 5.23 倍和 7.28 倍,说明浓度越高的充填料浆随着停泵时间的延长压力损失增大的趋势越明显。

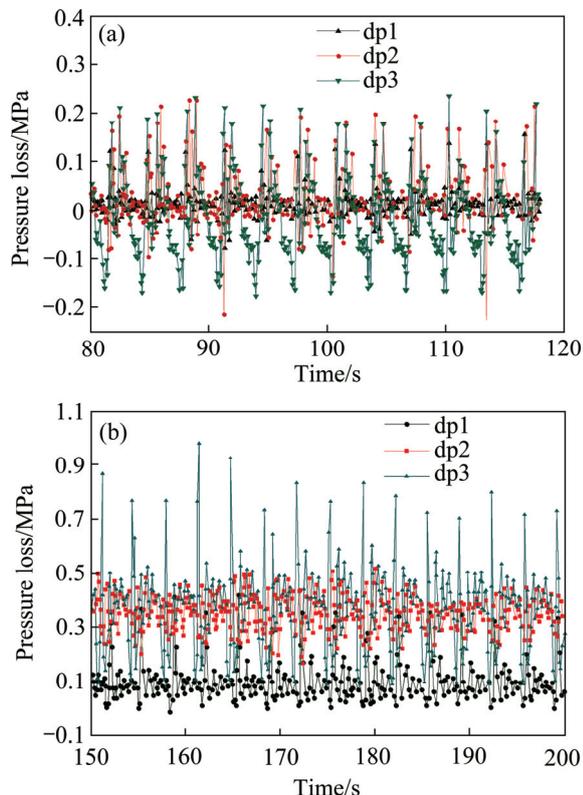


图 3 灰砂比为 1:4、输送速度为 2.0 m/s 不同浓度下充填料浆的压差图

Fig. 3 Change curves of pressure loss of backfilling slurry with time under condition of cement-tailing ratio of 1:4, transportation speed of 2.0 m/s and different solid mass fractions: (a) 72%; (b) 78%

第二组试验过程中,仪表显示阻力变化较大,经过较长的时间才达到一个相对较稳定的变化范围,测得的压力损失如图 5 所示。对第二组试验数据进行分

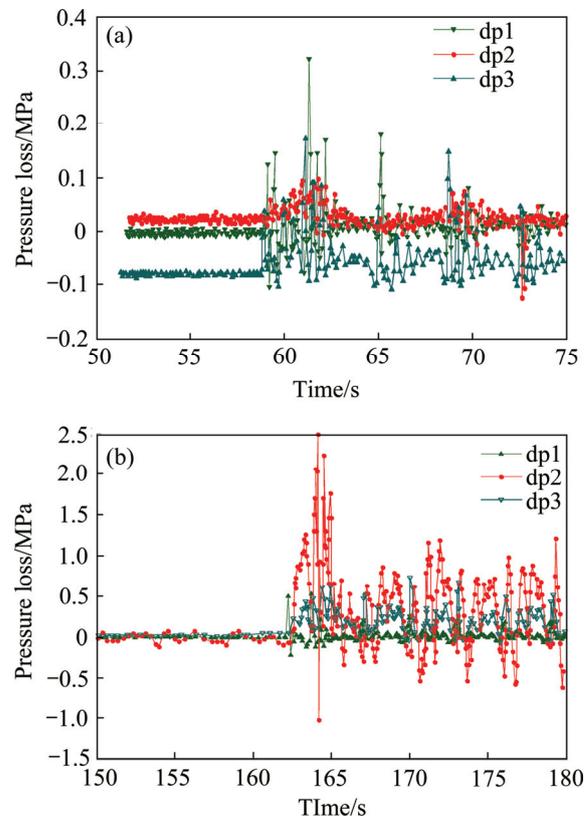


图 4 灰砂比为 1:4、输送速度为 2.0 m/s 不同浓度下停泵 15 min 后充填料浆的压差图

Fig. 4 Change curves of pressure loss of backfilling slurry with time under condition of cement-tailing ratio of 1:4, transportation speed 2.0 m/s, restart pump after stopping for 15 min and different solid mass fractions: (a) 72%; (b) 78%

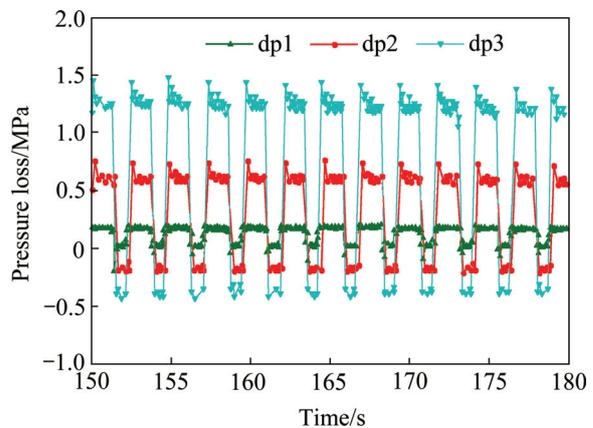


图 5 灰砂比 1:10、浓度 72%、输送速度 2.0 m/s 时充填料浆的压差图

Fig. 5 Change curves of pressure loss of backfilling slurry with time under condition of cement-tailing ratio of 1:10, solid mass fractions of 72%, transportation speed 2.0 m/s

析可知环管 30 m 水平管的平均压力损失为 0.13 MPa, 按此折算 2000 m 管道的压力损失为 8.6 MPa, 且不考虑在输送料浆过程中停泵之后能否再次启动的问题。说明灰砂比 1:10、质量浓度为 72% 的充填料浆中由于水泥含量较少, 粗颗粒较多, 在输送过程中易出现沉降, 输送不稳定等问题, 料浆具有典型的二相流特征。

将所测得的数据整理如表 3 和 4 所示。由表 3 和 4 结合尾砂充填料浆流变实验结果^[15]可知, 灰砂比为 1:4, 质量浓度为 78% 的料浆, 随着流速的增加, 每 100 m 压力损失有所增加, 但增加的幅度很小, 料浆呈现宾汉体的流动特征; 质量浓度降低至 72% 后, 每 100 m 的压力损失降低很大, 且输送速度越快, 压力损失越小, 出现剪切变稀现象, 料浆呈现屈服伪塑性体的流动特征。

由表 4 停泵实验数据可知, 灰砂比 1:4 的充填料浆停泵 15 min 最小的压力损失为 4.04 kPa/m, 停泵 30 min 最小的压力损失为 6.86 kPa/m, 最大的压力损失达到 12.51 kPa/m, 说明料浆在长距离泵送过程中, 一旦输送泵停泵超过 30 min, 依靠输送泵自身压力很难实现重启稳定泵送。

对比两组实验说明通过增加水泥含量能有效改善分级尾砂中细颗粒含量少、粗颗粒多、易沉降等问题, 显著减少充填料浆的输送阻力。同时, 也说明相同质

量浓度条件下不同灰砂比的充填料浆呈现出不同的流变模型。

3 工程应用

三山岛金矿目前开采的西南翼采场与充填站的垂直高差仅 165 m, 而输送距离达到 2200 m, 最大充填陪线将达到 14.3。矿体主要赋存在黄铁绢英化花岗质碎裂岩中, 矿体中裂隙较发育, 矿区主要采用机械化盘区房柱交替上升充填采矿法回采矿石, 根据充填体力学实验结果采用灰砂比 1:4~1:6, 质量浓度为 72% 的充填料浆作为一步采充填材料, 采用灰砂比 1:8~1:10, 质量浓度 72% 的充填料浆作为二步采充填材料, 采用灰砂比 1:4, 质量浓度为 72% 的充填料浆作为人工假底充填材料, 如图 6 所示。

三山岛新立矿区管网布置为: 充填料从充填站下料口出发, 通过充填钻孔到达-135 m 水平, 然后经充填钻井到达-165 m、-200 m 中段大巷, 经中段运输巷进入采场充填。充填管道由-165 m 反上达到-155 m 水平, 出现 10 m 高差的垂直管段。三山岛新立矿区充填站至西南矿区管网布置如图 7 所示。由环管实验可知, 料浆的适宜工作流速为 1.8~2.0 m/s, 综合料浆浓度和工作流速的影响, 需要的充填管道内径为 125~

表 3 灰砂比 1:4、浓度为 72%、78% 的充填料浆在不同输送速度下的平均压差表

Table 3 Result of differential pressure test slurry under condition of mass concentrations of 72% and 78%, cement-sand ratio of 1:4 at different transportation speeds

| Measure point | Differential pressure/MPa | | | | | |
|---------------|---------------------------|---------|---------|---------------------------|---------|---------|
| | Mass concentration of 78% | | | Mass concentration of 72% | | |
| | 1.6 m/s | 1.8 m/s | 2.0 m/s | 1.6 m/s | 1.8 m/s | 2.0 m/s |
| dp1 | 0.0777 | 0.0804 | 0.0796 | 0.0116 | 0.0101 | 0.0153 |
| dp2 | 0.0357 | 0.0357 | 0.0432 | 0.0110 | 0.0100 | 0.0215 |
| dp3 | 0.1424 | 0.1561 | 0.1567 | 0.0585 | 0.0438 | 0.0034 |

表 4 灰砂比 1:4、浓度为 72%、78% 的充填料浆单位距离平均压差

Table 4 Differential pressure per unit length of backfilling slurry under condition of mass concentrations of 72% and 78%, cement-sand ratio of 1:4 at different transportation speeds

| Mass concentration/% | Pressure loss/(kPa·m ⁻¹) | | | Pressure loss/(kPa·m ⁻¹) | |
|----------------------|--------------------------------------|---------|---------|--------------------------------------|--------|
| | 1.6 m/s | 1.8 m/s | 2.0 m/s | 15 min | 30 min |
| 72 | 1.20 | 1.12 | 1.10 | 4.04 | 6.86 |
| 78 | 1.39 | 1.50 | 1.51 | 6.41 | 12.51 |

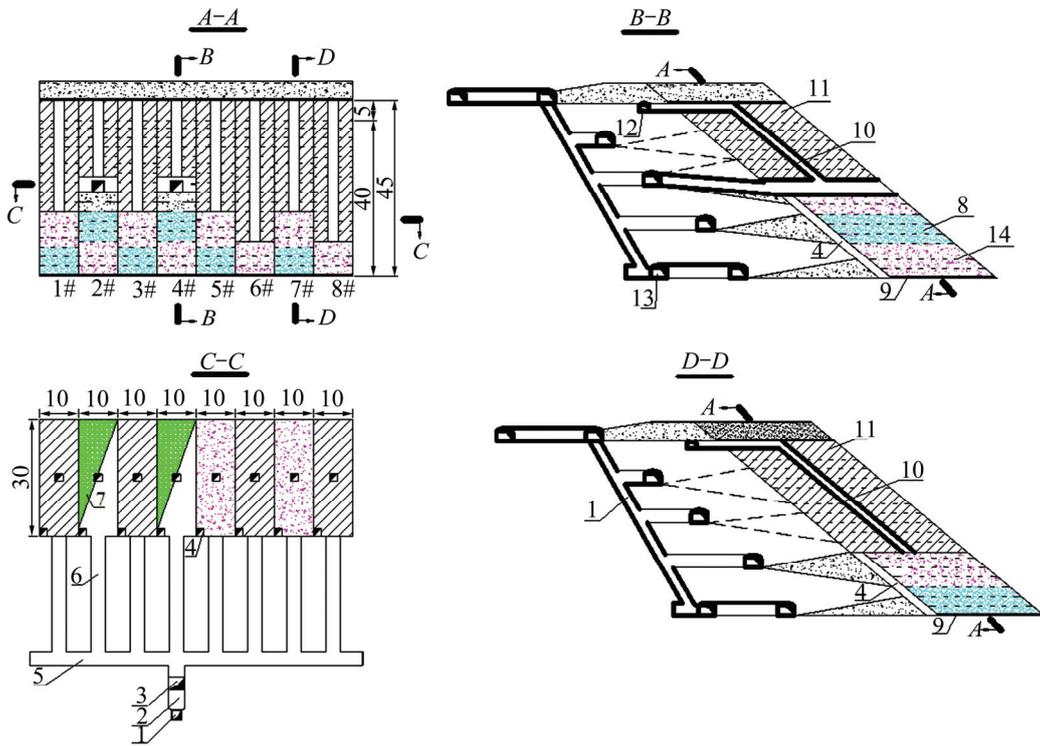


图 6 机械化盘区房柱交替上升充填采矿法

Fig. 6 Room-pillar alternation level backfill method: 1—Orepass; 2—Transverse roadway; 3—Ramp interface; 4—Water injection well; 5—Sublevel; 6—Crossheading; 7—Ore; 8—Fillback with cement-tailing ratio of 1:10; 9—Artificial roof; 10—Airshaft; 11—Top pillar; 12—Air return drift; 13—Middle transportation drift; 14—Fillback with cement-tailing ratio of 1:4

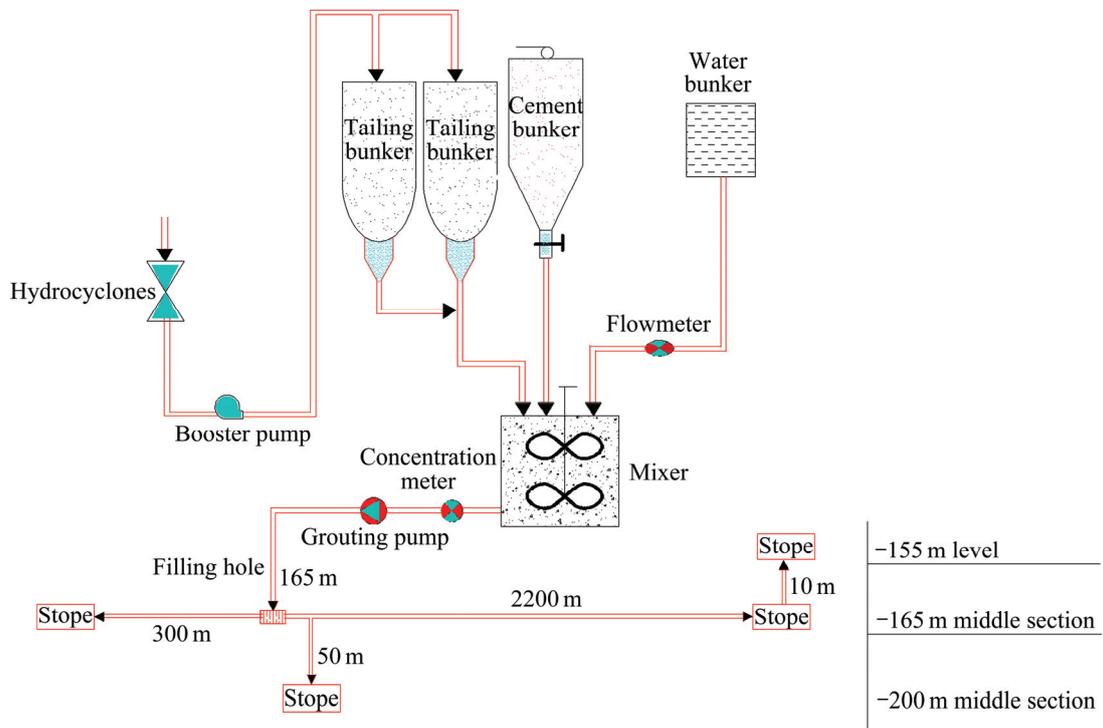


图 7 三山岛新立矿区充填站至西南矿区充填管道布置图

Fig. 7 Layout of pipeline transportation system in Southwest Xinli district of Sanshdao Gold Mine

130 mm, 考虑海水的腐蚀性, 选用的充填管道材质为陶瓷复合钢管。

3.1 依据环管实验计算总阻力

管道总阻力用下面公式进行计算:

$$H_t = H_l + H_h + H_p \quad (1)$$

式中: H_t 为管道总阻力, MPa; H_l 水平直管总阻力, MPa; H_h 垂直直管总阻力, MPa; H_p 为局部阻力, MPa。考虑局部压力损失的影响将模型简化为 $H_t = 1.08il$ (其中, i 为单位长度管压损失, MPa/m; l 为管道总长, 2365 m)。结合表 4 可以得出不同输送浓度和工作流速下的总阻力如表 5 所列。灰砂比 1:10, 质量浓度为 72% 的充填料浆, 折合的总阻力为 11.07 MPa。

表 5 灰砂比为 1:4, 不同质量浓度和工作流速下的总阻力
Table 5 Total resistance of pipeline to transport slurry under cement-sand ratio of 1:4 with different mass concentration under different flow velocity

| Mass concentration/% | Total resistance/MPa | | |
|----------------------|----------------------|---------|---------|
| | 1.6 m/s | 1.8 m/s | 2.0 m/s |
| 72 | 3.07 | 2.86 | 2.81 |
| 78 | 3.55 | 3.83 | 3.86 |

3.2 CFD 数值计算

在室内实验和环管实验的基础上, 利用 Fluent 流体模块对灰砂比 1:4 和灰砂比 1:10 的充填料浆管道阻力和速度分布情况进行分析。针对西南矿区充填管网系统建立二维管道模型, 垂直管道长为 165 m, 水平管道为 2200 m, 弯管半径为 0.38 m。模型分为 5 部分, 分别为进口、垂直管道、弯管连接、水平管道和出口, 其中垂直管道和水平管道分为 3300 和 44000 等分, 弯管部分分为 20 等分, 网格数量为 567972 个, 入口采用 2 m/s 的速度边界, 出口采用 outflow 边界。根据环管实验结果, 对灰砂比 1:4, 质量浓度为 72% 的充填料浆采用 Herschel-Bulkley 黏度模型, 料浆的流变通式为^[16]

$$\tau = \tau_0 + \mu_0 \dot{\gamma}^n \quad (2)$$

式中: τ 为剪切应力, Pa; τ_0 为屈服应力, 12.63 Pa; $\dot{\gamma}$ 为剪切速度, s^{-1} ; K 为塑性黏度系数, 0.673 Pa·s; n 为流态性能指数, 取 0.436。

充填料浆在圆管内的雷诺数 Re 为

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (3)$$

式中: ρ 为料浆密度, 1590 kg/m^3 ; v 为料浆流速, 2.0 m/s; D 为管道内径, 0.125 m; μ 为料浆有效黏度系数, 按式(4)计算:

$$\mu = K \left(1 + \frac{\tau_0 D}{6Kv} \right) \quad (4)$$

代入数据求得有效黏度系数 $\mu = 0.805$, 雷诺数 $Re = 474$, 可知料浆在管道的运动状态为层流。图 8 所示为管道内不同部位的速度分布。由图 8 可知, 管道内最大流速出现在弯管处, 达到 4.11 m/s, 垂直管道内最大速度为 2.74 m/s, 水平管道的最大流速为 2.86 m/s。管道内最大静压为 0.58 MPa, 最小静压为 -4.03 MPa, 管道总阻力为 4.61 MPa。对比环管实验, 总阻力结果略大于环管实验结果, 说明料浆的流动特性符合环管实验所确定的流变模型。图 9 所示为出口处的速度分布图。由图 9 可知, 管口大于 2 m/s 的速度分布在距管道右壁 0.1~0.3 m 之间, 出口处最大速度为

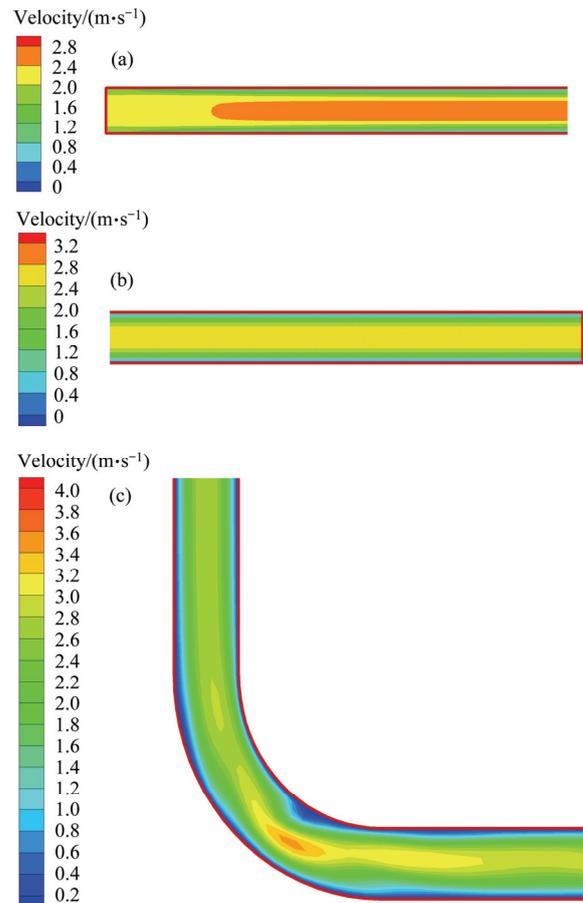


图 8 管道不同部位的速度分布

Fig. 8 Distributions of velocity different position in pipe: (a) Inlet; (b) Outlet; (c) Elbow

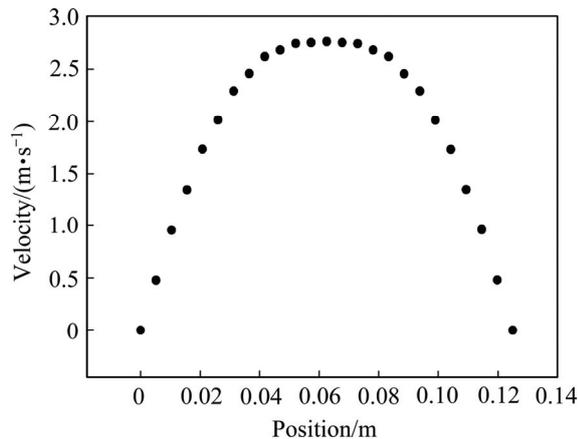


图9 出料口速度分布

Fig. 9 Distribution of velocity on outlet surface

2.86 m/s, 说明出口处有充足的速度保证料浆稳定输送。料浆在 165 m 的高差下可产生的压差为 2.571 MPa, 为保证充填系统的稳定性需要输送泵提供 2.5 MPa 以上的泵送压力。

由环管实验结果可知, 灰砂比 1:10、浓度 72% 的充填料浆不具有宾汉体和屈服伪塑性体的流动特征, 料浆是一种水和固体颗粒相混合的二相非牛顿流体, 因此对于灰砂比 1:10, 浓度 72% 的充填料浆需要利用两相流体力学研究料浆的流动特性。在建立的二维模型上, 采用欧拉模型和标准的 $k-\epsilon$ 湍流模型作为求解模型。定义第一象为水泥浆材料, 黏度为 1.24 Pa·s, 第二象为固体颗粒, 颗粒半径为尾砂平均颗粒半径 0.038 mm。边界条件定义管壁粗糙系数为 0.12, 湍流强度为 10%, 进口速度为 2 m/s, 出口为 Outflow 出口。计算结果表明, 最大静压为 0.64 MPa, 最小静压为 -8.45 MPa, 总阻力为 9.09 MPa, 最大流速为 2.58 m/s, 位于弯管部分。由于未考虑停泵时间对压力损失的影响, 在实际输送过程中, 为防止管道堵塞, 取安全系数 1.5, 除去重力产生的压力以外还需要输送泵提供 11 MPa 以上的压力。计算结果表明, 在不发生堵管事故的情况下, 选用的输送泵的泵送压力能满足输送要求。

4 结论

1) 在料浆输送过程中, 灰砂比和料浆浓度共同影响充填料浆的流变特性。灰砂比为 1:4, 不同浓度的充填料浆呈现出不同的流动特性, 随着浓度的提高, 料

浆流变模型由屈服伪塑性体逐渐向宾汉体转变。灰砂比 1:10 的充填料浆, 由于料浆中水泥含量少, 粗颗粒较多, 易出现沉降, 输送不稳定等问题, 料浆具有典型的二相流特征。

2) 灰砂比相同的充填料浆, 压力损失随着料浆浓度增大而增大。对于粗颗粒充填料浆, 提高灰砂比可以有效改善充填料浆级配, 降低沿程压力损失。

3) 远距离泵送料浆, 灰砂比相同的充填料浆质量浓度越高, 停泵重启所需要的启动压力越大, 充填系统运行时要求在泵送过程中输送泵能一直处于正常工作状态。

4) 根据环管实验结果, 利用 Fluent 软件对灰砂比 1:4 和 1:10 的充填料浆管道输送阻力进行了分析, 模拟结果说明充分的充填料浆流动特性实验是 Fluent 数值计算的基础。在料浆材料流变特性试验的基础上, 利用 Fluent 可为高倍线强阻力尾砂胶结充填系统的最佳运行参数提供设计依据。

REFERENCES

- [1] LIU Zhi-xiang, DANG Wen-gang, HE Xian-qun, LI Di-yuan. Cancelling ore pillars in large-scale coastal gold deposit: A case study in Sanshandao gold mine, China[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013, 23(10): 3046-3054.
- [2] 李夕兵, 刘志祥, 彭康, 赵国彦, 彭述权. 金属矿滨海基岩开采岩石力学理论与实践[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(10): 1945-1953.
LI Xi-bing, LIU Zhi-xiang, PENG Kang, ZHAO Guo-yan, PENG Shu-quan. Theory and practice of rock mechanics related to exploitation of undersea metal mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(10): 1945-1953.
- [3] LIU Zhi-xiang, DANG Wen-gang. Undersea safety mining of the large gold deposit in Xinli District of Sanshandao Gold Mine[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2012(12): 574-583.
- [4] HELMS W. Preparation and transportation systems for cemented backfill[J]. Mining Science and Technology, 1988, 7(2): 183-193.
- [5] HEWITT D, ALLARD S, RADZISZEWSKI P. Pipe lining abrasion testing for paste backfill operations[J]. Minerals Engineering, 2009, 22(12): 1088-1090.
- [6] 吴爱祥, 刘晓辉, 王洪江, 王贻明, 焦华喆, 刘斯忠. 结构流充填料浆管道输送阻力特性[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(12): 4326-4330.
WU Ai-xiang, LIU Xiao-hui, WANG Hong-jiang, WANG Yi-ming, JIAO Hua-jie, LIU Si-zhong. Resistance characteristics

- of structure fluid backfilling slurry in pipeline transport[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2014, 45(12): 4326–4330.
- [7] 王新民, 肖卫国, 张钦礼. 深井矿山充填理论与技术[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2005.
- WANG Xin-min, XIAO Wei-guo, ZHANG Qing-li. Deep well mine backfilling theory and technology[M]. Changsha: Center South University Press, 2005.
- [8] WHITE F M. Fluid mechanics[M]. New York: McGraw Hill Higher Education, 2006.
- [9] 董慧珍, 冯国瑞, 郭育霞, 戚庭野, 康立勋, 郭晓彦, 韩玉林. [J]. 采矿与安全工程学报, 2013, 30(6): 881–884.
- DONG Hui-zhen, FENG Guo-rui, GUO Yu-xia, QI Ting-ye, KANG Li-xun, GUO Xiao-yan, HAN Yu-lin. Pipe transportation characteristics of filling slurry in Xinyang mine[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2013, 30(6): 881–884.
- [10] WANG Xin-min, ZHAO Jian-wen, XUE Jun-hua, XUE Jun-hua, YU Guo-feng. Features of pipe transportation of paste-like backfilling in deep mine[J]. *Journal of Central South University of Technology*, 2011, 18(5): 1413–1417.
- [11] 吴迪, 蔡嗣经, 杨威, 王文潇, 王章. 基于CFD的充填管道固-液两相流输送模拟及试验[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(7): 2133–2140.
- WU Di, CAI Si-jing, YANG Wei, WANG Wen-xiao, WANG Zhang. Simulation and experiment of backfilling pipeline transportation of solid-liquid two-phase flow based on CFD[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2012, 22(7): 2133–2140.
- [12] 杨建, 王新民, 张钦礼, 柯愈贤. 含硫高黏性三相流态充填浆体管道输送性能[J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(4): 1050–1055.
- YANG Jian, WANG Xin-min, ZHANG Qin-li, KE Yu-xian. Pipeline transportation properties of high viscosity sulfur-content filling slurry in three-phase flow[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2015, 25(4): 1050–1055.
- [13] 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): 259–266.
- ZHANG Xiu-xiang, QIAO Deng-pan. Simulation and experiment of pipeline transportation of high density filling slurry with coarse aggregates[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2015, 25(1): 259–266.
- [14] FALL M, BENZAAZOUA M, OUELLET S. Experimental characterization of the influence of tailings fineness and density on the quality of cemented paste backfill[J]. *Minerals Engineering*, 2005, 18(18): 41–44.
- [15] 翟永刚, 吴爱祥, 王洪江, 陈琴瑞, 肖云涛, 寿震宇. 全尾砂膏体充填临界质量分数[J]. 北京科技大学学报, 2011, 33(7): 795–799.
- ZHAI Yong-gang, WU Ai-xiang, WANG Hong-jiang, CHEN Qin-rui, XIAO Yun-tao, SHOU Zhen-yu. Threshold mass fraction of unclassified-tailings paste for backfill mining[J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2011, 33(7): 795–799.
- [16] KELESSIDIS V C, DALAMARINIS P, MAGLIONE R. Experimental study and predictions of pressure losses of fluids modeled as Herschel-Bulkley in concentric and eccentric annuli in laminar, transitional and turbulent flows[J]. *Journal of Petroleum Science & Engineering*, 2011, 77(3): 305–312.

Pipeline transportation of backfilling slurry with high filling times line and strong resistance in undersea mining

LIU Zhi-xiang, XIAO Si-you, WANG Wei-hua, LI Xi-bing, LAN Ming

(School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: In order to solve the existed technical problems in the filling slurry pipeline transportation, such as high mass concentration, high filling times line, strong resistance, the flowing characteristics were studied by pumping looping pipe experiment. The rheological characteristics were analyzed by measuring the date of hydraulic loss and pumping resistance of restarting the pump after different pause times during transporting backfilling slurry with different matching, flux and mass fraction. Combining the results of physical properties experiment and pumping looping pipe experiment with non-Newtonian fluid mechanics, the flow and rheological characteristics of cement classified tailings backfilling slurry with different matching and mass fraction in pipeline transportation were concluded. Fluent was used to calculate the pressure loss and velocity distribution in pipeline. The simulation results show that, when the slurry is transported by ceramic compound steel pipe with inner diameter of 125 mm, the pressure loss of transporting the filling slurry with mass fractions of 72% and 78% and cement-sand ratio of 1:4 are below 5 MPa. The rheological model transforms yield-pseudoplastic model to Bingham model with the improvement of mass fraction. Moreover, the pipeline pressure loss of transporting the filling slurry with mass fractions of 72% and cement-sand ratio of 1:10 is greater than 9 MPa. The flow characteristic of this filling slurry presents typical solid-liquid mixing two phase liquid character. The results provide the theoretical basis and a new design idea for the parameter optimizing in pipeline transportation system to meet the requirements of safety and efficiency mining.

Key word: strong resistance; pipe pumping; pumping looping pipe experiment; undersea mining; rheological characteristic; computational fluid dynamics

Foundation item: Project(41372278) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project (2013BAB02B05) supported by Key Projects in the National Science and Technology Pillar Program during the Twelfth Five-year Plan Period

Received date: 2015-07-22; **Accepted date:** 2016-05-17

Corresponding author: LIU Zhi-xiang; Tel: +86-13207475458; E-mail: Liulzx@csu.edu.cn

(编辑 李艳红)