

基于 ANSYS FLUENT 的超深井长距离膏体充填管道输送模拟研究

石宏伟^{1,3}, 黄吉荣¹, 乔登攀³, 滕高礼², 王彬²

(1. 驰宏科技工程股份有限公司, 云南 曲靖 655000;

2. 云南驰宏锌锗股份有限公司, 云南 曲靖 655000;

3. 昆明理工大学, 昆明 650093)

摘要:为研究超深井长距离膏体充填管道自流输送问题,根据云南某矿山实际充填管路采用 Gambit 建立三维数值模型,用 ANSYS FLUENT 软件进行数值模拟计算,以水平管道和弯管为例研究了不同配比、浓度和流量下的管道压力、流速变化规律和管道阻力损失之间的关系。通过井下工业环管的压力监测系统,统计分析矿山井下实际管道压力监测值,井下实际监测结果和采用 ANSYS FLUENT 软件三维数值模拟研究结果较为接近,表明 ANSYS FLUENT 软件模拟超深井长距离膏体充填管道输送是可行的,研究结果可为矿山实现超深井、长距离、大倍数条件下膏体充填管道输送提供技术支持。

关键词: ANSYS FLUENT 软件;数值模拟;膏体充填;管道输送;管道压力;管道阻力损失

中图分类号: TD853.34

文献标志码: A

文章编号: 1671-4172(2020)02-0005-08

Simulation of long distance paste filling pipeline transportation in ultra deep well based on ANSYS FLUENT

SHI Hongwei^{1,3}, HUANG Jirong¹, QIAO Dengpan³, TENG Gaoli², WANG Bin²

(1. Chihong Technology Engineering Co., Ltd., Qujing Yunnan 655000, China;

2. Yunnan Chihong Zn & Ge Co., Ltd., Qujing Yunnan 655000, China;

3. Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

Abstract: To study the problem of artesian transportation of long distance paste filling pipeline in ultra deep well, according to the actual filling pipeline in a mine in Yunnan Province, a three-dimensional numerical model was established by gambit, and the numerical simulation was carried out by ANSYS FLUENT software. Taking horizontal pipeline and elbow as examples, the relationships between the change rule of pipeline pressure and velocity and the loss of pipeline resistance under different proportion, concentration and flow rate were studied. Through the pressure monitoring system of the underground industrial ring network, the monitoring value of the actual underground pipeline pressure in the mine was statistically analyzed. The results of the actual underground monitoring were close to the three-dimensional numerical simulation results by using ANSYS FLUENT software, which shows that it is feasible to simulate the long-distance paste filling pipeline transportation in the ultra deep well by using ANSYS FLUENT software, and the research results can provide technical support for paste filling pipeline transportation to realize the ultra deep well, long-distance and large fold line for the mine.

Key words: ANSYS FLUENT software; numerical simulation; paste filling; pipeline transportation; pipeline pressure; pipeline resistance loss

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51164016);甘肃省科技重大专项计划项目(1203GKDC003)

作者简介:石宏伟(1989—),男,硕士研究生,主要从事金属矿山充填采矿法及工艺技术研究。

膏体具有不离析、不沉淀、自流平、采场脱水量少、接顶率高、充填质量好、充填效率高等优点^[1-3],近年来在国内外运用的越来越广泛。对于超深井长距离大倍数条件下,如何将膏体充填料浆顺利输送

到井下采空区,是实现膏体充填关键技术之一^[4]。而传统的膏体管道输送的研究方法主要是用膏体充填工业环管实验系统测出沿程阻力损失,再计算出其他相关参数,其实验费用高、强度大、时间长、有一定的局限性^[5-8]。随着计算机技术和流体力学的不断发展,利用专业分析软件进行计算机仿真模拟,不仅可提供有效的分析方法和更加直观的结果,还可节约大量费用支出。因此,三维数值模拟仿真也逐步成为研究膏体充填管道输送的一种趋势。

膏体充填管道输送属于流体力学的范畴,其数值模拟软件较多。目前常用的有 ANSYS FLUENT、CFX、CFD、Fluent、STAR-CD、STAR-CCM+、Phoenics 软件等。国内外许多学者也用相关软件进行过研究,如 WANG 等^[5]使用 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研究,但未研究分析管道输送的压力;张钦礼等^[6]针对孙村煤矿的煤矸石似膏体充填料浆进行研究,但无矿山实际工业论证;吴迪等^[7]使用 Fluent 软件对料浆管道输送的阻力损失和弯管部分的受力情况进行了分析,但其研究基于固-液两相流。邓代强等^[8]用 Fluent 软件对冬瓜山铜矿长距离管道输送对弯管处的磨损情况进行了研究,但未研究分析流速;张修香等^[4,9]采用结构流理论用 Fluent 软件模拟大金川和红山充填管道输送,但其研究无井下实际监测压力统计分析。

为较好研究云南某矿超深井长距离膏体充填管道输送在不同配比下的压力、流速的变化规律,以其实际充填管道为实例,用 ANSYS FLUENT 软件进行三维数值模拟研究在超深井、长距离、大倍线下不同配比下的压力、流速在管道中的变化规律及管输阻力损失与其影响因素之间的关系,为矿山实现超深井长距离管道输送提供技术支持。

1 三维管道输送数值建模

1.1 矿山工程概况

云南某矿山膏体充填技术已成功应用 10 余年,矿山充填系统主要分为地表充填系统和井下输送系统。地表主要由深锥浓密机、充填制备系统和自流管道输送系统组成。井下管道输送系统主要由充填钻孔和充填管道组成。矿山目前主要采用膏体的自流输送,最长充填管线单线长 12 000 m 左右,充填倍线 3.5~7,现年充填能力达 18 万 m³。

1.2 几何模型的建立

根据膏体充填井下充填管网系统特点,为深入

研究膏体在超深井长距离大倍线条件下的管道输送规律,主要选择矿山 1 211 m 中段采场为模型构建。地表膏体充填制备站→副 3[#] 钻孔→2 053 m 中段平巷→4[#] 钻孔→1 751 m 中段平巷→2[#] 斜井→1 571 m 中段平巷→1 571 m 中段至 1 451 m 中段斜坡道→1 451 m 中段平巷→1 451 m 中段至 1 331 m 中段斜坡道→1 331 m 中段至 1 261 m 中段斜坡道→1 261 m 中段平巷→1 261 m 中段至 1 211 m 中段斜坡道→1 211 m 中段平巷→采场。其中管道垂直高差为 1 327 m,管线总长为 7 475 m,几何倍线为 5.63,管道内径为 150 mm,垂直段与水平段采用 90°直管高压闸阀连接。模型的二维平面模型建模简化如图 1 所示。使用 ANSYS FLUENT 软件中的前处理程序 Gambit 生成计算区域几何体,再进行有限元划分。主要以 90°弯管和水平管为主。

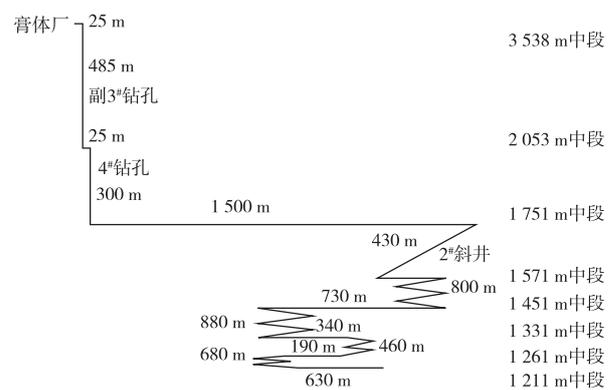


图 1 矿山充填管网几何模型示意图

Fig. 1 Geometric model of mine filling pipe network

1.3 模型的控制方程

1) 浆体的连续方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho, \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

其中, ρ 为密度 kg/m³; t 为时间 s; v 为浆体的速度 m/s; 假设浆体不可压缩处理, 故其料浆密度也视为不变, 可将连续方程简化成:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

其中, u 、 v 、 w 为速度矢量沿 x 、 y 、 z 三个方向的速度分量。

2) 动量守恒方程:

$$\begin{cases} \frac{du}{dt} = X - \frac{1}{\rho} \frac{\partial F}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \\ \frac{dv}{dt} = Y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial F}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \\ \frac{dw}{dt} = Z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial F}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \end{cases} \quad (3)$$

式中: $X、Y、Z$ 分别表示流体微元在 $x、y、z$ 方向的面力 N ; μ 为粘度 $\text{Pa} \cdot \text{s}$; F 表示流体微元受到的面力的合力 N 。

3) 能量守恒方程: 充填浆体管道输送时在管道中流动的浆体也遵循符合能量守恒定律, 在流体力学中通常采用伯努利方程来表示:

$$Z_1 + \frac{F_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{F_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + h'_1 \quad (4)$$

式中: $Z_1、Z_2$ 为流体位置; $F_1、F_2$ 和 $v_1、v_2$ 为流体在位置 $Z_1、Z_2$ 处的压力和速度; γ 为料浆的容重; h'_1 为流体从位置 Z_1 运动到位置 Z_2 过程中内摩擦力做的功。

1.4 数值模拟方案及参数

数值模拟中主要采用 7:0:1.15 和 3.5:0.5:1.35 两种配比, 充填料浆重量浓度 74%、76% 和 78%, 流速为 0.8、1.0、1.5 m/s 共 18 组方案进行模拟研究方案。使用 LVDV-1T 旋转粘度计测定膏体相关流变参数。试验测得的流变参数见表 1。

表 1 云南某矿山充填料浆的流变参数

Table1 Rheological parameters of filling slurry in a mine of Yunnan Province

配比 (尾砂: 机制砂: 水泥)	容重/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	浓度/ %	黏度/ ($\text{Pa} \cdot \text{s}$) ⁻¹	屈服应力/ Pa
7:0:1.15	1 910	74	0.922	106.9
	1 982	76	1.265	122.1
	2 030	78	1.326	154.19
3.5:0.5:1.35	1 991	74	0.811	94.03
	2 040	76	1.289	150.1
	2 109	78	1.561	196.93

1.5 数值模型边界条件的设置

根据建立的管道三维数值模型, 采用 Gambit 软件划分管道的面网格、体网格, 并设置管道入口为速度入口 (Velocity-inlet), 管道出口为 (Out-flow), 操作条件为标准大气压, 在竖直方向 (y 轴负方向) 考虑重力加速度 9.8 m/s^2 。再将模型导入 ANSYS FLUENT 软件中, 按照测得的流变参数将选用欧拉法来描述流体运动进行计算, 最后输出计算结果。

2 ANSYS FLUENT 三维数值模拟结果

通过在室内实验室内用 LVDV-1T 旋转黏度计测膏体充填料浆的流变参数, 得到料浆的性质属于屈服-假塑性体, 符合 H-B 模型, 故三维数值模拟选用 H-B 模型^[5-6]进行数值模拟研究, 将三维数值模拟导入 ANSYS FLUENT 软件后输入实验室得到的参数进行计算, 得出数值模拟研究结果。

2.1 管道输送压力规律特性研究

由于膏体充填时进出口位置存在压力差使膏体在充填管道中能够流动。当重力势能 $>$ 压差时膏体在充填管道内能够实现自流; 当重力势能 $<$ 压差时需要充填泵送。为了深入研究分析管输阻力特性, 膏体充填管道输送模拟结果的压力有静压、动压和总压。其中: 总压 = 静压 + 动压。三维数值模拟中, 地表膏体充填制备站 2 538 m 标高为入口坐标 (0, 0) 点, 为参考压力点, 即点 (0, 0) 处的静压为 0。

通过模拟研究, 结合图 2 至图 7 的膏体充填管道进口静压云图、动压云图和总压云图、监测面云图研究发现如下规律:

1) 因浆体的静态压力是由浆体受重力的作用产生, 所以静压的大小与浆体所处的位置有关, 当浆体位置原点坐标的上方时其值为正, 反之为负。因此, 充填管道在 2 053 m 中段的 3[#] 钻孔脚和 1 751 m 中段的 4[#] 钻孔脚的静压均大于水平管道的静压。

2) 在地表入口处, 由于膏体靠自身重力自流, 膏体管道输送的稳定性差, 因磨蚀、射流效应作用变化管壁切应力、管道动压和总压波动较大, 其中入口速度越大其波动越剧烈; 随着膏体流态逐渐稳定, 动压逐渐稳定, 管壁切应力减小, 入口处的动压和总压会逐渐趋于稳定。

3) 随着膏体充填料浆进入充填钻孔, 膏体充填料浆的流速迅速增大, 膏体充填料浆的动压也迅速增大。因此, 在钻孔口附近会产生负压现象, 同时由于膏体充填料浆的流速较大, 该区域的动压较大。在地表 3[#] 钻孔口和 2 053 m 中段 4[#] 钻孔口均会出现负压现象。

4) 在膏体充填料浆的速度增大一定值后, 水平管道内会趋于稳定, 其动压也会趋于稳定, 膏体充填料浆的动压和总压沿着管道中心向管道壁呈梯度减小的趋势, 即管道中心处最大, 近管壁处小, 并呈对称分布; 而管壁处的动压为零或接近零, 其主要原因是由于“边界效应”导致。其现象在 1 751 m 中段、1 451 m 中段、1 211 m 中段的水平管充填管道最为明显。

5) 充填管道 90° 弯管中, 在弯管处靠近弯管的圆心方向的动压和总压较小, 而靠近弯管圆心外侧的压力较大, 有较大的压力梯度。膏体充填料浆的动压和总压过了弯管段还不稳定, 必须经过一段过渡区, 浆体的动压才能够稳定, 特别是当充填管道的转角越大, 其规律越明显, 其现象主要在 2 538 m 地表副 3[#] 钻孔入口、2 053 m 中段副 3[#] 钻孔脚、2 053 m

中段 4# 钻孔入口和 1 751 m 中段 4# 钻孔脚的 90° 弯管最为突出。

6) 膏体充填料浆对管道的总压和动压的变化规律基本一致。随着膏体充填料浆的浓度和流速的增大, 充填管道的动压和总压均变大; 在相同浓度和流速下 3.5 : 0.5 : 1.35 的管道动压和总压要大于 7 : 0 : 1.35。

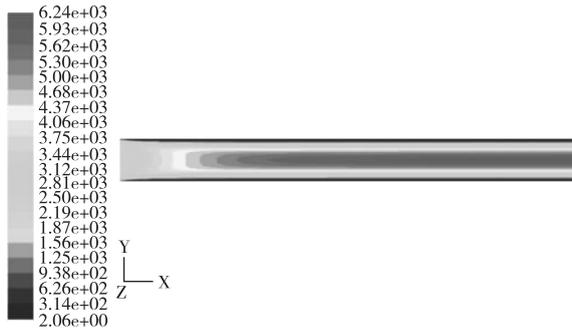


图 2 2 538 m 中段入口处管道动压云图

Fig. 2 Dynamic pressure nephogram of pipeline at the middle section entrance of 2 538 m

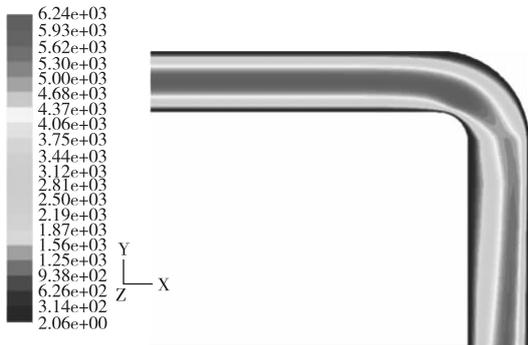


图 3 2 053 m 中段 4# 钻孔口处管道动压云图

Fig. 3 Dynamic pressure cloud chart of pipeline at 4# borehole opening in 2 053 m middle section

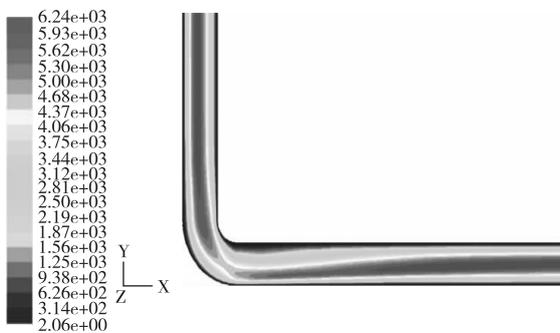


图 4 1 751 m 中段 4# 孔脚处管道动压云图

Fig. 4 Dynamic pressure nephogram of pipeline at 4# hole foot in the middle section of 1 751 m

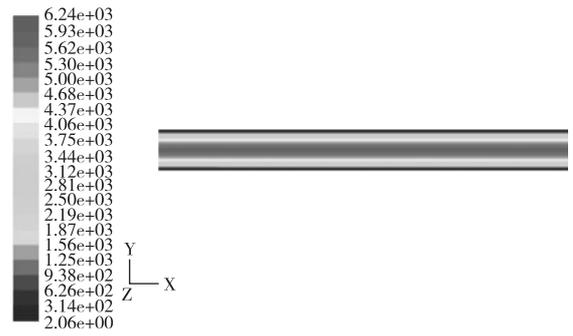


图 5 1 211 m 中段水平管道的动压云图

Fig. 5 Dynamic pressure nephogramat middle horizontal pipeline of 1 211 m

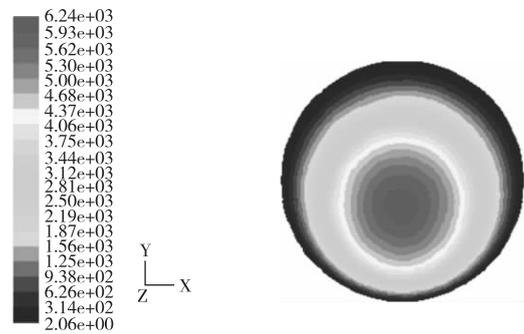


图 6 1 751 m 中段 4# 孔脚处管道监测面动压云图

Fig. 6 Dynamic pressure nephogram of pipeline monitoring surface at 4# hole foot in the middle section of 1 751 m

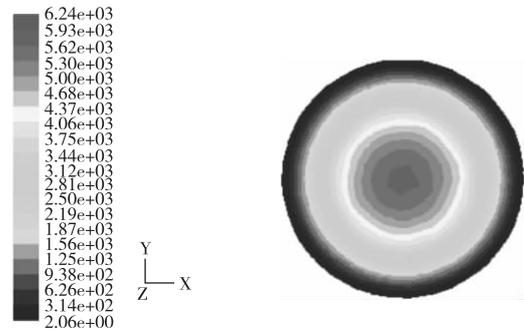


图 7 1 211 m 中段水平管道监测面动压云图

Fig. 7 Dynamic pressure nephogramat middle horizontal pipeline monitoring surface of 1 211 m

2.2 管道输送流速规律特性研究

通过 ANSYS FLUENT 的模拟计算结果和速度云图可以发现, 18 个方案中的速度规律基本一致, 只是在速度的大小上有所差别, 因篇幅有限, 方案 14 结果见图 8 至图 11。

通过对三维管道数值模型进行数值模拟研究计算, 结合图 8 至图 11 的速度云图、各位置监测面速度云图研究发现如下规律:

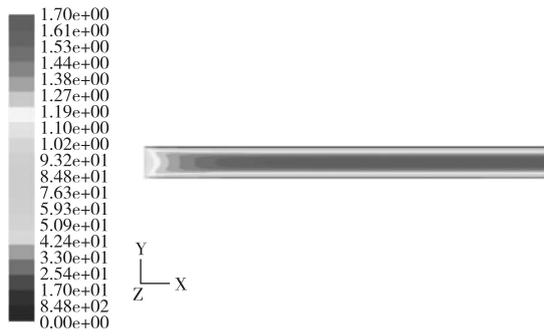


图 8 2 538 m 地表入口速度 (1.0 m/s) 云图

Fig. 8 Cloud chart of 2 538 m surface entrance velocity (1.0 m/s)

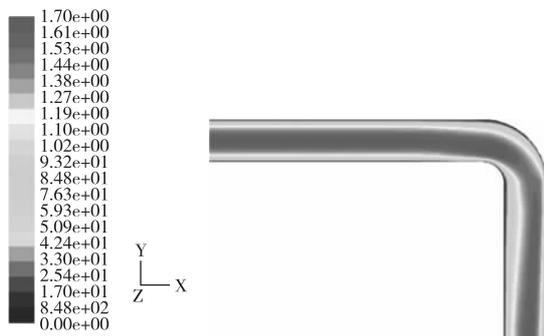


图 9 2 053 m 中段 4# 钻孔口速度 (1.0 m/s) 云图

Fig. 9 Cloud chart of 4# drilling hole speed (1.0 m/s) in 2 053 m middle section

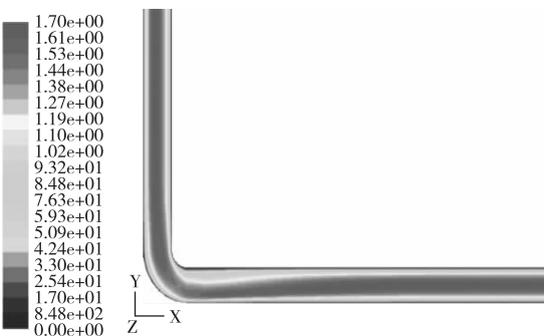


图 10 1 751 m 中段 4# 钻孔脚速度 (1.0 m/s) 云图

Fig. 10 Cloud chart of 4# drilling foot speed (1.0 m/s) in the middle section of 1 751 m

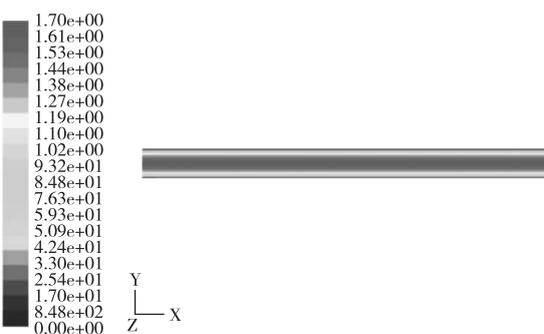


图 11 1 751 m 中段水平管速度 (1.0 m/s) 云图

Fig. 11 Cloud chart of horizontal pipe speed (1.0 m/s) in the middle section of 1 751 m

1) 2 538 m 充填管道入口处速度大小基本为入口边界条件大小,但是进入管道后因浆体受到重力的作用,浆体的速度逐渐增大,当增大到一定值后,浆体的流速相对趋于稳定。因边界层表面效应(“伯努利效应”),充填管道整个管道壁面处的速度接近零或为零。

2) 在地表 2 538 m 副 3# 钻孔、2 053 m 中段 4# 钻孔充填管道 90° 向下弯管处、2053 m 中段 3# 钻孔脚充填管道和 1 751 m 中段 4# 钻孔脚充填管道的弯管处速度有剧烈波动,其主要原因是在弯管处浆体的流速和方向发生了变化。在充填管道弯管靠近圆心方向的速度相对较小,而离弯管的圆心较远处的速度相对较大。膏体充填料浆通过钻孔 90° 弯管后,在竖直钻孔或水平钻孔中会有一定区域内出现波动,最后逐渐区域平稳。

3) 当浆体过了过渡阶段趋于稳定后,在水平管道上呈有较明显的速度梯度分布,在水平管道的充填管道半径方向,管道圆心附近速度较大,且该区域的流速变化较小称为“流核区”。

4) 当膏体充填料浆的入口速度为 0.8 m/s 时最大速度为 1.49 m/s; 1.0 m/s 时最大速度为 1.7 m/s; 1.5 m/s 时最大速度为 2.51 m/s。表明在入口速度越大,料浆的最大速度越大。因此,在矿山实际充填中根据矿山实际情况可合理控制入口速度。对于自流充填时在建设充填站时可合理设置搅拌槽至充填钻孔的充填管道来合理控制入口速度;泵送充填时可合理控制输送泵压来控制料浆的入口速度。

2.3 管道输送阻力损规律特性研究

通过用 ANSYS FLUENT 软件按照数值模拟 18 种方案,膏体充填管道输送的三维数值模拟研究得出不同方案下管道阻力损失值统计如表 3 所示。浓度与管输阻力损失关系如图 12、13 所示。

根据 ANSYS FLUENT 软件三维数值模拟研究计算结果,统计出各中段的阻力损失值和绘制出充填料浆的配比、浓度、流速与沿程阻力损失的关系图,可得出:

1) 充填料浆的管输阻力损失值在配比、流速一定的条件下均随料浆质量浓度的增大而增大。充填料浆质量浓度对管输阻力的影响极为敏感。充填配比试验 3.5 : 0.5 : 1.15 的充填料浆重量浓度在 76% ~ 78% 时,结合矿山开展的配比试验研究结果,从充填料浆中固体颗粒组成看,粗、细颗粒分布范围很较为合理,固、液混合物在固体浓度达到一定程度以后,细颗粒合水泥的胶凝作用后可形成絮网结构

表 3 云南某矿山三维数值模拟计算阻力损失统计表

Table 3 Statistical table of resistance loss calculated by 3D numerical simulation for a mine in Yunnan

方案编号	配比	浓度/%	流速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	阻力损失/($\text{Pa} \cdot \text{m}^{-1}$)		
				1 751 m 中段	1 451 m 中段	1 221 m 中段
1			0.8	290.23	230.54	198.45
2	7 : 0 : 1.15	74	1.0	438.35	358.74	287.34
3			1.5	705.38	587.32	507.69
4			0.8	400.35	328.43	288.79
5	7 : 0 : 1.15	76	1.0	678.29	580.92	476.32
6			1.5	900.69	794.89	667.83
7			0.8	650.66	512.67	488.24
8	7 : 0 : 1.15	78	1.0	876.34	765.32	697.85
9			1.5	1 200.59	1 088.98	913.23
10			0.8	498.35	368.87	308.93
11	3.5 : 0.5 : 1.15	74	1.0	665.43	536.32	485.06
12			1.5	990.56	688.91	597.59
13			0.8	655.78	498.78	438.79
14	3.5 : 0.5 : 1.15	76	1.0	787.32	605.34	598.32
15			1.5	1 023.47	866.73	799.54
16			0.8	848.56	623.62	577.43
17	3.5 : 0.5 : 1.15	78	1.0	1 189.78	867.56	756.89
18			1.5	1 568.89	1 209.53	1 089.97
			0.8			

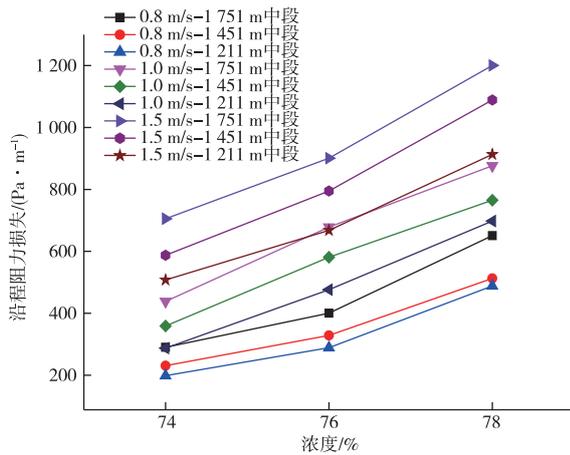


图 12 (7 : 0 : 1.15) 浓度与管输阻力损失关系

Fig. 12 (7 : 0 : 1.15) Relationship between concentration and pipeline resistance loss

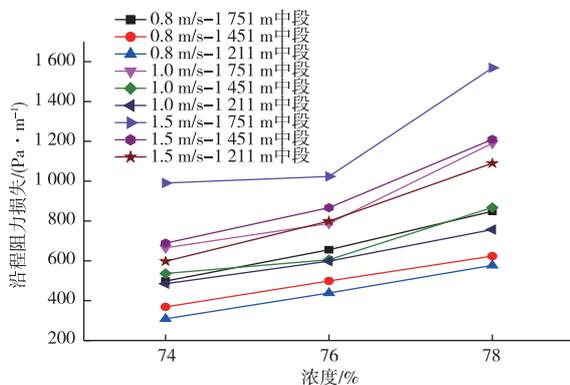


图 13 (3.5 : 0.5 : 1.15) 浓度与管输阻力损失关系

Fig. 13 (3.5 : 0.5 : 1.15) Relationship between concentration and pipeline resistance loss

的均质浆液,从而使充填料浆具有良好的流动性、可塑性和可泵性。

2) 充填管输阻力损失随料浆流速的增大而呈指数增长;入口流速越大充填管道阻力损失值就越大;流速 1.5 m/s 管道输送阻力损失值基本为 0.8 m/s 阻力损失值的 2 倍。

3) 添加机制砂(3.5 : 0.5 : 1.15) 充填料浆的管输阻力损失较全尾砂(7 : 0 : 1.15) 充填料浆的管输阻力损失值大 150~250 Pa/m。其主要原因是相同质量浓度条件下,添加少量机制砂后料浆的均匀性较差,充填料浆也较接近两相流状态,故其管输阻力较大,其管输阻力损失也越大。

3 工业实际监测

为较好监测超深井长距离管道输送的压力变化情况,在井下充填管道上安装 EH(Endress+Hauser) 压力表进行监测,监测数据通过井下 PLC 子站经工业环网将数据传输至地表膏体制备室的 DCS 控制室。结合三维数值建模管道,主要选取 1 751 m 中段、1 451 m 中段和 1 211 m 中段的压力表数据。在矿山开始充填时压力表的数据波动较大,待矿山充填稳定后压力表的监测数据基本稳定,因此,主要选取充填稳定时的监测数据,如表 4 和表 5 所示。

通过统计井下安装充填管道输送压力表监测值统计分析可得:



图 14 矿山井下管道压力监测表

Fig. 14 Underground pipeline pressure monitoring table

表 4 配比为 3.5 : 0.5 : 1.35 充填井下管道压力监测值
Table 4 Pressure monitoring values of filling underground pipeline with ratio of 3.5 : 0.5 : 1.35

序号	距离/m	1 751 m 中段 压力表 A/MPa	1 751 m 中段 压力表 B/MPa	阻力损失/ (Pa · m ⁻¹)
1	1 500	6.24	5.21	686.67
2	1 500	6.22	5.15	713.33
3	1 500	6.21	5.22	660.00
4	1 500	6.24	5.19	700.00
5	1 500	6.25	5.18	713.33
6	1 500	6.23	5.17	706.67
7	1 500	6.19	5.13	706.67
8	1 500	6.32	5.26	706.67
9	1 500	6.29	5.09	800.00
10	1 500	6.20	5.13	713.33
平均值		6.24	5.17	710.67

序号	距离/m	1 451 m 中段 压力表 A/MPa	1 451 m 中段 压力表 B/MPa	阻力损失/ (Pa · m ⁻¹)
1	730	5.10	4.22	586.67
2	730	5.09	4.23	573.33
3	730	4.98	4.12	573.33
4	730	5.09	4.23	573.33
5	730	5.10	4.26	560.00
6	730	5.07	4.28	526.67
7	730	5.11	4.22	593.33
8	730	5.12	4.26	573.33
9	730	5.08	4.22	573.33
10	730	5.10	4.21	593.33
平均值		5.08	4.23	572.67

序号	距离/m	1 211 m 中段 压力表 A/MPa	1 211 m 中段 压力表 B/MPa	阻力损失/ (Pa · m ⁻¹)
1	630	2.52	2.22	476.19
2	630	2.49	2.18	492.06
3	630	2.47	2.15	507.94
4	630	2.51	2.23	444.44
5	630	2.52	2.21	492.06
6	630	2.62	2.29	523.81
7	630	2.55	2.26	460.32
8	630	2.53	2.23	476.19
9	630	2.55	2.23	507.94
10	630	2.54	2.26	444.44
平均值		2.53	2.23	482.54

表 5 配比为 7 : 0 : 1.25 充填井下管道压力监测值
Table 5 Pressure monitoring values of filling underground pipeline with ratio of 7 : 0 : 1.25

序号	距离/m	1 751 m 中段 压力表 A/MPa	1 751 m 中段 压力表 B/MPa	阻力损失/ (Pa · m ⁻¹)
1	1 500	5.77	5.12	433.33
2	1 500	5.83	5.13	466.67
3	1 500	5.84	5.16	453.33
4	1 500	5.87	5.11	506.67
5	1 500	5.83	5.1	486.67
6	1 500	5.88	5.12	506.67
7	1 500	5.92	5.14	520.00
8	1 500	5.93	5.13	533.33
9	1 500	5.88	5.09	526.67
10	1 500	5.93	5.1	553.33
平均值		5.87	5.12	498.67

序号	距离/m	1 451 m 中段 压力表 A/MPa	1 451 m 中段 压力表 B/MPa	阻力损失/ (Pa · m ⁻¹)
1	730	4.35	3.72	420
2	730	4.33	3.69	426.67
3	730	4.32	3.68	426.67
4	730	4.31	3.71	400.00
5	730	4.3	3.69	406.67
6	730	4.35	3.75	400.00
7	730	4.3	3.72	386.67
8	730	4.33	3.71	413.33
9	730	4.29	3.68	406.67
10	730	4.28	3.66	413.33
平均值		4.32	3.70	410.00

序号	距离/m	1 211 m 中段 压力表 A/MPa	1 211 m 中段 压力表 B/MPa	阻力损失/ (Pa · m ⁻¹)
1	630	2.65	2.44	333.33
2	630	2.69	2.47	349.21
3	630	2.61	2.38	365.08
4	630	2.65	2.41	380.95
5	630	2.62	2.39	365.08
6	630	2.65	2.42	365.08
7	630	2.59	2.35	380.95
8	630	2.58	2.36	349.21
9	630	2.62	2.4	349.21
10	630	2.64	2.41	365.08
平均值		2.63	2.40	360.32

1) 1 751 m 中段、1 451 m 中段和 1 211 m 中段的压力表 A 监测值均大于压力表 B 监测值,表明钻孔脚和斜坡道脚的压力最大,经过水平管后会有部分管道阻力损失,其压力也会逐步减小。1 751 m 中段压力表监测值 > 1 451 m 中段的压力表监测值 > 1 211 m 中段的压力表监测值,主要原因是 1 751 m 中段的压力表 A 位于 485 m 长的副 3[#] 钻孔、300 m 长的 4[#] 钻孔脚,因此,1 751 m 中段压力表值较大,但经水平管、斜坡道和弯管后会有较大的管道阻力损失,故管道压力会减小。

2) 3.5 : 0.5 : 1.25 的管道实际监测压力大于 7 : 0 : 1.25 的管道压力。表明添加机制砂后的充填料浆管道输送的管道压力大于未添加机制砂的管

道压力。

3) 三维数值模拟研究的结果稍大于井下实际管道监测值,其主要原因是井下实际管道的小弯头和斜坡道转弯处建立三维数值模型多,其管道阻力较大,故其管道压力较小。但井下管道实际监测数值与三维数值模拟变化规律基本一致,管输阻力大小和管输阻力损失数值较为接近,表明 ANSYS FLUENT 软件三维数值模拟可用于矿山实际管道输送模拟研究。

4 结论

通过建立云南某超深井长距离管道输送模型,利用 ANSYS FLUENT 软件对管道输送模型进行三维数值模拟研究,分析管道输送压力、流速和管道阻力损失的变化规律,可得出以下结论:

1) 超深井长距离膏体充填管道输送“边界效应”在管壁处的动压、总压和流速为零或接近零;水平管道的动压、总压和流速沿着管道中心向管道壁呈梯度减小的趋势,管道中心处最大,近管壁处小,并呈对称布,在管道中心存在“流核区”。

2) 90°充填弯管中在弯管处靠近弯管的圆心方向的动压、总压和流速较小,而靠近弯管圆心外侧的压力较大,在弯管处有较大的压力梯度,在弯管处存在“过渡区”。

3) 充填料浆的管输阻力损失值随料浆质量浓度、流速的增大基本呈指数增大的趋势。料浆质量浓度对管输阻力的影响极为敏感,流速次之。

4) ANSYS FLUENT 软件可对超深井长距离管道输送模型进行三维数值模拟研究,结果与矿山实际监测结果较为接近,表明 ANSYS FLUENT 软件可用于矿山充填管道输送模拟研究。

参 考 文 献

- [1] 石宏伟,乔登攀,程纬华.基于 FLUENT 的全尾砂充填管道输送模拟试验与分析[J].黄金,2015,36(5):32-35.
SHI Hongwei, QIAO Dengpan, CHENG Weihua. Simulation test and analysis of full tailings filling pipeline transportation based on FLUENT[J]. Gold, 2015, 36(5): 32-35.
- [2] 乔登攀,程纬华,张磊,等.现代采矿理念与充填采矿[J].有色金属科学与工程,2011,2(2):7-14.
QIAO Dengpan, CHENG Weihua, ZHANG Lei, et al. Modern mining concept and filling mining[J]. Science and Engineering of Nonferrous Metals, 2011, 2(2): 7-14.
- [3] 石宏伟,黄吉荣,滕高礼,等.高浓度分级尾砂充填料浆管输阻力影响因素研究与分析[J].有色金属(矿山部分),2019,71(6):104-109.
SHI Hongwei, HUANG Jirong, TENG Gaoli, et al. Research and analysis on the influence factors of slurry pipe transport resistance of high concentration graded tailings filling[J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2019, 71(6): 104-109.
- [4] 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. Pipe transportation simulation and test of high concentration filling slurry for coarse aggregate[J]. Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015, 25(1): 258-266.
- [5] WANG X M, ZHAO J W, XUE J H, et al. Features of pipe transportation of paste-like backfilling in deep mine[J]. Journal of Central South University of Technology, 2011, 18(5): 1413-1417.
- [6] 张钦礼,谢盛青,郑晶晶,等.充填料浆沉降规律研究及输送可行性分析[J].重庆大学学报,2011,34(1):105-109.
ZHANG Qinli, XIE Shengqing, ZHENG Jingjing, et al. Study on settlement law of filling slurry and feasibility analysis of transportation[J]. Journal of Chongqing University, 2011, 34(1): 105-109.
- [7] 吴迪,蔡嗣经,杨威,等.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 Sijing, YANG Wei, et al. Simulation and experiment of solid-liquid two-phase flow in filling pipeline based on CFD[J]. Chinese Journal of nonferrous metals, 2012, 22(7): 2133-2140.
- [8] 邓代强,朱永建,王发芝,等.充填料浆长距离管道输送数值模拟[J].安徽大学学报(自然科学版),2012,36(6):36-43.
DENG Daiqiang, ZHU Yongjian, WANG Fazhi, et al. Numerical simulation of long distance pipeline transportation with filling slurry[J]. Journal of Anhui University(Natural Science Edition), 2012, 36(6): 36-43.
- [9] 张修香,乔登攀,孙宏生.废石-尾砂高浓度料浆管道输送特性模拟[J].中国有色金属学报,2019,29(5):1092-1101.
ZHANG Xiuxiang, QIAO Dengpan, SUN Hongsheng. Simulation of pipeline transportation characteristics of waste rock tailing high concentration slurry[J]. Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2019, 29(5): 1092-1101.
- [10] YU G B, YANG P, CHEN Z C, et al. Study on pipeline self-flowing transportation of cement tailing fill slurry based on FLUENT software[J]. Advanced Materials Research, 2013, 734/737: 833-837.
- [11] 张亮,罗涛,许杨东,等.高浓度充填料浆流变特性及其管道输送模拟优化研究[J].矿业研究与开发,2016,36(4):36-41.
ZHANG Liang, LUO Tao, XU Yangdong, et al. Rheological properties of high concentration filling slurry and simulation optimization of pipeline transportation[J]. Mining Research and Development, 2016, 36(4): 36-41.
- [12] CLAVERÍA I, JAVIERRE C, PONZ L. Method for generation of rheological model to characterize non-conventional injection molding by means of spiral mold[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 162/163: 477-483.
- [13] 陈新,史秀志,周健,等.泡沫砂浆 W 型管长距离输送特性的 CFD 模拟[J].中国有色金属学报,2016,26(8):1782-1793.
CHEN Xin, SHI Xiuzhi, ZHOU Jian, et al. CFD simulation of long distance transportation characteristics of foam mortar W pipe[J]. Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2016, 26(8): 1782-1793.