

CLSM浆体充填管道数值模拟分析

刘杰松, 吴玉国, 李小玲, 张浩然

辽宁石油化工大学石油天然气工程学院, 辽宁 抚顺

收稿日期: 2025年3月28日; 录用日期: 2025年5月27日; 发布日期: 2025年6月9日

摘要

管道运输是石油的主要运输方式, 它的安全性和环保一直是人们所关心的问题。为合理废弃地下油气管道, 确保可持续发展, 本文以CLSM为主要研究对象, 采用计算流体动力学软件, 对CLSM浆体在管内的流体动力学特性进行数值仿真。在水平方向上, 浆液在水流方向上是一种稳定的分层流流态, 但在入口附近的某一区域会有不稳定的流动。在管径不变的情况下, 随着流量的增加, 核心半径逐渐变小, 核心流速逐渐增加, 单位长度内的流阻显著增加。与采用流变试验和考虑壁面滑移作用的灌输阻力分析方法进行比较, 得出的最大相对误差小于10%。通过对CLSM技术中浆体填充管道的流动特性进行了研究, 为其在实际工程中的应用奠定了理论基础。

关键词

流体动力学, 管道运输, 灌输阻力, 壁面滑移, 浆体管道, CLSM浆体

Numerical Simulation Analysis of CLSM Slurry Filling Pipeline

Jiesong Liu, Yuguo Wu, Xiaoling Li, Haoran Zhang

College of Petroleum Engineering, Liaoning Petrochemical University, Fushun Liaoning

Received: Mar. 28th, 2025; accepted: May 27th, 2025; published: Jun. 9th, 2025

Abstract

Pipeline transportation is the main mode of oil transportation, and its safety and environmental protection have always been issues of concern. To rationally abandon underground oil and gas pipelines, and ensure sustainable development, this paper takes CLSM as the main research object and uses computational fluid dynamics software to numerically simulate the fluid dynamic characteristics of CLSM slurry in the pipe. In the horizontal direction, the slurry is a stable stratified flow state in the flow direction of water, but there is an unstable flow in a certain area near the inlet. Under

the condition of constant pipe diameter, with the increase of flow rate, the core radius gradually decreases, the core flow velocity gradually increases, and the flow resistance per unit length significantly increases. Compared with the pipeline resistance analysis method using rheological tests and considering the wall slip effect, the maximum relative error obtained is less than 10%. Through the study of the flow characteristics of the slurry filling the pipeline in the CLSM technology, a theoretical basis has been laid for its application in actual engineering.

Keywords

Fluid Dynamics, Pipe Transport, Instillation Resistance, Wall Slip, Slurry Pipe, CLSM Slurry

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

管线运输是油气资源最主要的运输方式,在世界各国的油气资源和化工产业中占有举足轻重的地位[1][2]。目前,国内已步入石油和天然气管线报废的高发时期[3][4]。综上所述,随着我国废弃停用油气管道高峰即将到来,为确保可持续发展,合理废弃地下油气管道,开展废弃油气管道的无害化处置技术研究迫在眉睫[5]-[8]。本文研究利用低成本可控性低强度材料 CLSM 充填退役油气管道,提供一种有效、环保、经济的无害化废弃油气管道处置方案[9][10]。通过向清洗达标后的废弃油气管道内充填无害的可控性低强度材料(CLSM)浆体,使有害成分发生转化、封闭、固定等作用,变为无污染的固体,以消除地面沉陷和管道残留物二次污染的隐患[11][12]。

陈建宏[13]等人结合某矿山工业试验的结果,运用 Fluent 软件对浆体管道输送进行了阻力数值模拟,通过模拟与实测结果的对比可看出,两者误差在 5%左右,得出了浆体流速与沿程阻力损失之间的关系方程,进而运用此模型计算得到该浆体管输自流的速度区间 1.82~2.23 m/s。

徐华天[14]等人以废管线的关键步骤和国外废管线处理实例为基础,论述了管线残渣的处理方法,以期对我国废油气管线的科学处理具有一定的参考价值。

康叶伟[15]采用普通清管扫线、联合清洗等工艺方法,可彻底达到对管道内残余物的高效洁净清除,同时,各种工艺措施的联合运用,可达到对废管线的安全、环境化处理。

侯金山[16]介绍了国外在废旧管线标准中的先进经验及建议做法,并对管线设施体系的拆除工作范围进行了分析;保存废旧管线的维修资料,并及时向社会公开。

张雪松[17]-[19]等人运用数理统计变差系数法确定了填料流动性、强度等参数的权重,并用功效函数法对其进行了归一化,得出了相应的工作性能。

基于上述论述,本文依据流体力学的基础理论知识,开展充填废弃管道 CLSM 材料的流变特性及输送阻力研究,并建立数值计算模型对浆体管道流动动态特征进行模拟,以期形成较完备和高效的 CLSM 充填退役油气管道的技术体系,为工程应用提供可靠的理论支持和技术保障。

2. 计算原理

流体力学基本原理应依据质量守恒、动量守恒、能量守恒三个定律,得到流体控制方程,即 Navier-Stokes 方程组(简称 N-S 方程组)[20][21]。

2.1. CLSM 性能要求

传统的充填体以水泥为胶凝材料,其用量大、材料成本高。采用无害化充填技术对油气管线安全退役具有重要意义。在 CLSM 制备过程中,为降低填充成本,常需寻找替代材料。CLSM 是一种性能优良、环境友好的新型复合胶凝材料。本章主要研究了充填退役管线在使用过程中所应满足的性能指标(流动性、泌水率、抗压强度等)。

2.1.1. 高流动性

流动性,作为 CLSM (连续流式悬浮密实化)系统中的一个至关重要的技术参数,它在整个填充过程中扮演着决定性的角色。这个指标直接影响到最终的填充效率和工程质量。为了确保其准确性和可靠性,本研究采用了先进的流变仪来进行 CLSM 浆液流动性的精确测试。粉煤灰具有球形的外形,这种独特的形状特征使得 CLSM 浆液在流动时能够更好地展现出其形貌特征,从而保证了浆液的高流动性。

2.1.2. 低强度

CLSM 是由美国混凝土学会(ACI229R)规定的 28 天内最大抗压强度不超过 8.27 MPa 的一种物质。由于以后有基坑开挖的情况,其实际的抗压强度通常在 0.35~2.1 MPa 之间。针对我国石油天然气管网中存在的问题,特别是对于地表塌陷较为敏感的地区,以及此类管线存在着较大的泌水性和二次填充困难等问题,提出了 CLSM 的抗压强度指标:28 天抗压强度 1.5~2.8 MPa,水泥剂量 100~200 kg/m³。

2.1.3. 低泌水性

泌水性是 CLSM 的一个重要特征,尤其是在其质量分数为 65%~70%的情况下,更是如此。水泥基材料因水分转化为自由水而产生的泌水现象,使水泥基材料的体积变小,从而导致水泥基材料的沉降,当水用量较大时(200 kg/m³)时,水泥基材料的沉降量可以达到 10.0~20.0 mm/米。因此,采用 CLSM 材料充填退役油气管线,需确保密实度、高充填率,对于退役油气管线,应控制用水量,使成型体密实均匀,减小沉降,保证较高的充填率,泌水率应控制在 5%以内。

2.2. 结构流输送原理

流变学是一门以流体流动和变形为主要研究内容的学科。用流变学方程和流变学曲线描述了流体的流变性。流变方程是描述流体剪切力与剪切率间关系的本构方程,它是研究渗流与变形问题的重要前提。流体流变的影响因素较为复杂,通常采用实验方法建立剪切应力-剪切率(即流变曲线),再结合理论分析,建立相应的流变方程。

流体流变学以流体为研究对象,按剪切力与剪切率的关系可分为牛顿流体与非牛顿流体。非牛顿流体按其流变性质可分为三类:① 流变性与时间无关的流体;② 流变性与时间有关的流体;③ 粘弹性流体。

CLSM 浆料的粘度随浓度由低向高相应增加,对固体颗粒具有抑制作用。当充填料浓度达到临界点时,浆料的输运特征由两相流过渡到结构流。理想情况下,在管道纵向上没有可测量的浓度梯度,呈现无沉降状态。当这种浆体与管壁间的摩擦系数大于浆体重力势能时,在无外力作用下,浆体无法在自重作用下自流。当管内压力足够大时,泥浆才能沿着管道流动。

在此基础上,提出了一种新方法,即确定某一浓度值作为结构流动的临界浓度是困难的。一般情况下,颗粒尺寸越小,其临界浓度越低。

3. 控制方程

3.1. 质量守恒方程

(1) 质量守恒方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

引入矢量符号 $\text{div}(a) = \frac{\partial a_x}{\partial x} + \frac{\partial a_y}{\partial y} + \frac{\partial a_z}{\partial z}$ 上式可以写作:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho u) = 0 \quad (2)$$

式中, ρ 是密度, kg/m^3 ; t 是时间, s ; u 是速度矢量, u 、 v 和 w 是速度矢量在 x 、 y 和 z 方向的分量。

(2) 能量守恒方程如下式:

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \text{div}(\rho u T) = \text{div}\left(\frac{k}{C_p}\right) + S_T \quad (3)$$

式中, ρ 是密度, kg/m^3 ; t 是时间, s ; T 是温度, K ; u 是速度, m/s ; K 为流体的传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; S_T 为能量源项, J 。对于本文的研究对象 CLSM 浆体, 假定材料密度恒定, 且不考虑温度的影响, 为恒定值。CLSM 浆体各时刻流变参数见表 1。

Table 1. Rheological parameters of CLSM slurry at each time
表 1. CLSM 浆体各时刻流变参数

时间/min	屈服应力/Pa	塑性粘度(Pa·s)
0	10.32	0.54
90	8.58	0.376
180	10.56	0.47
300	12.68	0.58
480	20.62	0.987

3.2. CLSM 浆体流变模型

弯管道数值模拟的几何模型如图 1 所示, 其中垂直管道长度取 2 m, 以利于浆体在弯管处呈现稳定的层流状态, 水平管道长度取 5 m, 管道内径 0.6 m, 弯管处的弯曲半径(内径)分别取 $R = 0.3 \text{ m}$ 、 $R = 0.5 \text{ m}$ 、 $R = 0.7 \text{ m}$ 。以 xoy 面为对称面, 取管道一半作为计算模型, 网格划分基于 ICEM CFD16.0, 弯管网格划分如图 2 所示, 网格划分如图 3 所示。

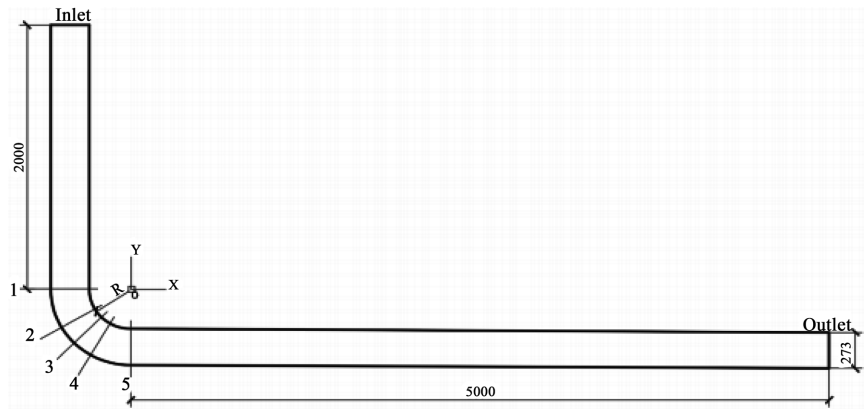


Figure 1. Geometric model of pipeline
图 1. 管道几何模型



Figure 2. Bending pipe grid division
图 2. 弯管网格划分

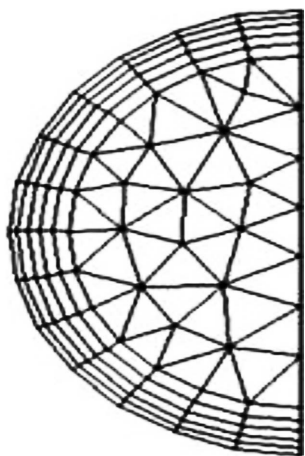


Figure 3. Section grid division
图 3. 截面网格划分

3.3. 边界条件的设定

① 根据管道充填施工实际情况，将管道上端入口设定为速度入口，采用笛卡尔坐标系，方向垂直入口；② 管道壁面施加无相对滑移的固壁边界条件；③ 出口的浆体流速为未知量，因而出口边界条件为压力出口，考虑 CLSM 料浆为不可压缩流体，其在管道内的体积流量为定值，则影响水头损失的主要因素是管道摩擦力及料浆本身的性质；④ 重力加速度取 9.81 m/s^2 ；温度取常温 293K 。

根据弯管流动模拟方案见表 2 等参数计算出 CLSM 材料在管道中流动时的雷诺数为可知 CSLM 浆体充填管道流动时为层流状态，因此，选择层流模型。设置求解控制参数中压力、密度、体积力和动量的松弛因子分别为 0.3、1、1。和 0.7，设置流场流速并初始化，设置残差监视器中的存储迭代次数为 100，最后输入迭代次数为 100，开始迭代计算直至模型计算达到平衡。取弯管最上端截面为 1-1 截面，弯管转弯角度为 30° 、 45° 、 60° 、 90° 处截面分别为 2-2、3-3 截面。

Table 2. Pipe bending flow simulation scheme
表 2. 弯管流动模拟方案

方案编号	管道内径/m	流量/(m^3/h)	弯管弯曲半径/m	流速/m
1	0.273	80	0.3	0.380
2	0.273	100	0.3	0.475

续表

3	0.273	120	0.3	0.570
4	0.273	160	0.3	0.775
5	0.273	80	0.4	0.380
6	0.273	100	0.4	0.475
7	0.273	120	0.4	0.570
8	0.273	160	0.4	0.775
9	0.273	80	0.5	0.380
10	0.273	100	0.5	0.475
11	0.273	120	0.5	0.570
12	0.273	160	0.5	0.775

4. 数值模拟分析

4.1. 不同流量下 CLSM 浆体速度场的模拟结果分析

不同流量条件各流量条件下, CLSM 浆体管输平均流速分别为 0.380 m/s、0.475 m/s、0.570 m/s、0.755 m/s、 $D = 0.273$ m, 弯管弯曲半径为 0.3 m。从 1-1 截面至 3-3 管道截面中心线流速分布图如图 4、图 5、图 6 所示, 其中纵坐标为 1-1 截面至 3-3 截面中心线各点与坐标原点(即弯管圆心)的距离, 可见流速分布呈现出随外壁一侧梯度增大的变化情况。

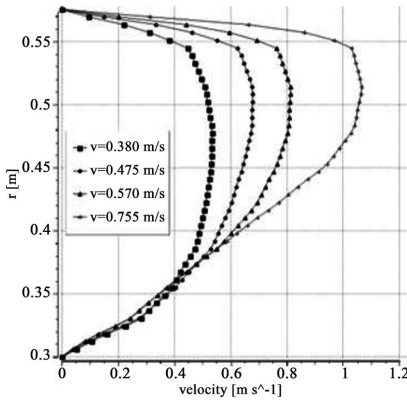


Figure 4. Changes in velocity distribution of center line of section 1-1
图 4. 1-1 截面中心线流速分布图变化

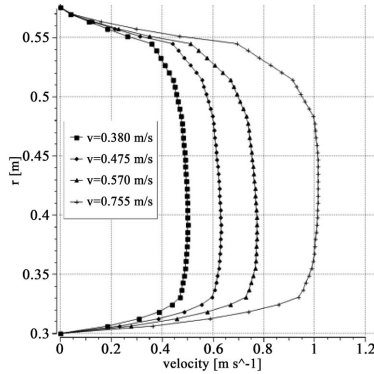


Figure 5. Changes of velocity distribution in the center line of section 2-2
图 5. 2-2 截面中心线流速分布图变化

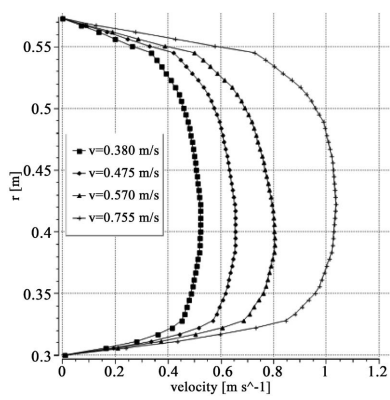


Figure 6. Changes in velocity distribution of center line of section 3-3
图 6. 3-3 截面中心线流速分布图变化

4.2. CLSM 浆体充填弯管道压力场模拟响

(1) 通过不同流量条件下弯管道涡流阻力计算见表 3 可知管道内浆体压力沿流动方向逐渐下降。在弯管附近外壁压力大而内壁压力小，其管道外壁的较高压力对管道外壁的强度提出了更高的要求。弯管处的水头损失主要来自两个方面，一是 CLSM 浆体流过弯管时与管壁的摩擦损失，二是弯管内涡流的产生造成的能量损失。即流速增大，压力增幅越显著。

同弯管曲率半径条件下 CLSM 浆体弯管局部浆体管道内压力随流动方向逐渐下降，弯管处压降变化剧烈，随弯管弯曲半径减小而增大。CLSM 浆体在管道内径 $D = 0.273\text{ m}$ ， $v = 0.380\text{ m/s}$ 条件下，弯管弯曲半径分别为 0.3 m 、 0.5 m 、 0.7 m 的弯管内流动时，弯管段压力降分别比相同条件下同等长度的直管单位长度压力降增大了 19.41% 、 6.88% 、 5.18% ，可见随着弯管弯曲半径越小，压力降增幅显著。其中由涡流产生的水头损失占比分别为 16.26% 、 6.43% 、 4.92% ，可见随着弯管弯曲半径减小，涡流产生的水头损失占比增大。在实际工程应用中，如遇退役油气管道存在管道弯曲半径较小时，应注意浆体在管道转弯处局部阻力较大的情况。

Table 3. Calculation of eddy current resistance of curved pipeline under different flow conditions
表 3. 不同流量条件下弯管道涡流阻力计算

流量/(m ³ /h)	流速/(m ³ /h)	$\Delta p/\text{Pa}$	$\Delta p_s/\text{Pa}$	$\Delta p_b/\text{Pa}$	$\Delta p_b/\Delta p_s$
80	0.380	178.54	166.57	12.01	6.72%
100	0.475	213.26	178.49	35.04	16.43%
120	0.570	247.35	187.98	59.17	23.92%
160	0.775	335.18	212.88	123.89	36.96%

5. 结论

本文对 CLSM 浆体在弯管中的流动动态特征进行了数值模拟，分析了不同时刻、不同流量及不同管径条件下弯管内和不同流量、不同弯管曲率半径条件下弯管内浆体的速度场和压力场的变化规律。

具体内容如下

(1) 在相同的时间，相同的管径和不同的流量情况下，从管壁向管心的速度逐渐增加。在管道进口一定距离处，浆液处于非稳态流动状态，而在此段过渡段后，浆液流动表现为具有层流核的稳定分层流动状态。随着 CLSM 浆料流量的增加，管截面内流核半径逐渐减小，而速度逐渐增加。试验结果表明，在水平方向上，由于受重力影响，管内流速比上段稍大；与此同时，随着流量的增加，单位长度内的流阻

明显增加,且在进口变化较大。

(2) 对不同时刻的 CLSM 浆液进行了数值模拟,结果表明,浆液流变参数随时间而改变,速度变化较小,压力变化较大。在实际工程中,需要对充填段进行合理划分,对浆液的制备、输送和充填进行有效的组织,并根据管径和充注长度合理控制排量,避免因注浆输送或充填时间过长而引起的流变特性参数改变造成的泵压过高甚至堵管等工程事故。

(3) 通过管输阻力数值模拟结果与基于流变仪试验获得的流变参数、考虑壁面滑移效应及浆体时效特性的管输阻力计算结果进行对比分析,发现两者之间的相对误差不超过 10%,说明水平充填管流数值模拟能够为充填体施工提供技术支撑,模拟结果更符合工程实际。

(4) 采用数值模拟方法,研究了浆体在弯管内的流动特性,结果表明,浆体在弯管段内的流速与压力分布呈现出外大内小的特征,同时还发现了伴随主流的漩涡。随水流速度的增加,弯管段沿程阻力增加明显,涡流水头损失所占的比例显著增加;因此,弯管内泥浆容易堵塞,造成管道损坏等事故。在实际工程中,当遇到流速很大、弯头半径很小的情况下,要特别关注管道弯曲部位(特别是弯头外壁)浆液的局部阻力。

参考文献

- [1] 罗扬,王文友,杨林,等. 浅析油气长输管道报废处置技术要求[J]. 天然气与石油, 2022, 40(6): 8-14.
- [2] 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.
- [3] 厉严. 改变大口径管道弯头曲率半径的影响分析[J]. 管道技术与设备, 2025(1): 53-56.
- [4] 宋长松,杨仕奇,许东波,等. 充液管道流致振动影响因素分析[J]. 管道技术与设备, 2025(1): 9-14+40.
- [5] Zhang, X., Yu, R. and Chen, J. (2018) A CFD Simulation of CLSM Filling with Piping on Herschel-Bulkley Rheological Model. *Emerging Materials Research*, 7, 128-137. <https://doi.org/10.1680/jemmr.17.00065>
- [6] 解明洋,李斌,崔蕾,等. 陆上油气管道弃置方案选择依据[J]. 油气储运, 2014, 33(8): 825-828.
- [7] 吴东容,余东亮,贺焕婷,等. 山区油气管道废弃处置技术简析[J]. 油气田地面工程, 2021, 40(3): 87-92.
- [8] 李亮,刘炳瑞,张润辉,等. 倾斜管道内圆柱状颗粒运动的数值模拟[J]. 力学与实践, 2022, 44(5): 1172-1178.
- [9] 董鑫,单永瑞,刘易诺,等. 非牛顿流体气泡羽流涡特性数值模拟研究[J]. 化工学报, 2023, 74(5): 1950-1964.
- [10] 李奇,王鹏. 地下废弃管道破损内渗透发地面沉降性状研究[J]. 山西建筑, 2023, 49(18): 6-11.
- [11] 侯金山,贾彦琨,蔡亮,等. 国内外管道废弃处置标准差异分析[J]. 油气田地面工程, 2016, 35(6): 51-53.
- [12] 康叶伟,左莉,郭正虹,等. 陆上油气管道的废弃处理[J]. 油气储运, 2015, 34(2): 122-127.
- [13] 陈建宏,陈岍曦,张钦礼,等. 基于 Fluent 的充填料浆管道输送阻力模拟[J]. 科技导报, 2015, 33(9): 64-68.
- [14] 徐华天,马宏伟,康叶伟,等. 油气管道废弃处置技术及其应用[J]. 油气储运, 2015, 34(7): 699-703.
- [15] 康叶伟,左莉,邵磊,等. 陆上废弃油气管道的安全环保处置[J]. 油气储运, 2016, 35(12): 1261-1266.
- [16] 杨慧,陈国明,李新宏,等. 国内外海底油气管道废弃处置规范[J]. 油气储运, 2017, 36(11): 1326-1331.
- [17] 张雪松,俞然刚,陈金平,等. 废弃输油管道充填用可控低强度材料性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2017, 36(6): 1823-1829+1840.
- [18] 范庆春. 青岛炼化废弃输油管道注浆固化无害化处理工艺研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国石油大学, 2018.
- [19] Zhang, X., Yu, R. and Chen, J. (2020) Abandonment Research and Environmental Impact Analysis for Retired Dong-Huang Pipelines. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 735, Article 012072.
- [20] 张雪松. 充填退役油气管道用可控性低强度材料流变特性及工程应用[D]: [博士学位论文]. 东营: 中国石油大学(华东), 2020.
- [21] 周德星,张晨. 提升石化管道企业油气长输管道废弃判定及处置水平研究[J]. 化工管理, 2022(22): 139-145.