



上海交通大学学位论文

**基于 MPS-DEM 耦合方法的振荡立管固-
液混输流动数值模拟研究**

姓 名：李仁祥

学 号：121010910083

导 师：王建华

学 院：船舶海洋与建筑工程学院

学科名称：船舶与海洋工程

学位类型：学术型

申请学位层次：硕士

2024 年 1 月



21002867



A Dissertation Submitted to

Shanghai Jiao Tong University for Master Degree

**Numerical simulation of solid-liquid mixed flow in
oscillating marine risers based on MPS-DEM
coupling method**

Author: Li Renxiang

Supervisor: Wang Jianhua

School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering

Shanghai Jiao Tong University

Shanghai, P.R.China

January, 2024



21002867



上海交通大学 学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名：

日期： 年 月 日

上海交通大学 学位论文使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。

本学位论文属于 ☐ 公开论文

☐ 内部论文，☐1 年/☐2 年/☐3 年 解密后适用本授权书。

☐ 秘密论文，____ 年（不超过 10 年）解密后适用本授权书。

☐ 机密论文，____ 年（不超过 20 年）解密后适用本授权书。

（请在以上方框内打“√”）

学位论文作者签名：

指导教师签名：

日期： 年 月 日

日期： 年 月 日



21002867



摘要

目前海底矿物的采集输运主要由基于浮式平台的水力提升系统实现,该系统主要由采矿车、泵、立管、运输船等部分组成。立管作为参与水力输运的主体,在深海采矿中,立管在外部受到剪切流的影响,并沿立管表面产生脱落的涡流,导致在其周围形成不稳定的尾流区域,并产生流体力,立管在流体力作用下发生往复位移并产生振荡运动现象。立管的振荡会极大影响管道内部流场的特性,开展振荡影响下的立管内部流场研究对得到压力损失、输运速率等一系列影响提升系统效率的参数具有重要意义。

本文的研究工作主要基于移动粒子半隐式方法 (Moving Particle Semi Implicit, MPS) 和离散单元法 (Discrete element method, DEM) 的耦合方法,并使用 MPSDEM-SJTU 求解器对多种不同工况下的立管内部固-液两相流流场进行仿真模拟。该耦合方法为无网格类粒子法, MPS 用于模拟液相, DEM 用于模拟固相,可以计算固体颗粒与管壁及固体颗粒间的碰撞情况。其不受网格质量的限制,且在处理剧烈流动问题时具有优势。主要内容如下:

首先,对本文所使用固-液两相流数值模拟方法进行介绍,包括液相数值模型,固相数值模型和固-液两相相互作用模型。在此基础上,介绍了求解器的架构及物理模型的边界条件,并对管道的振荡运动方式进行分析。

然后,验证求解器在管道流场计算中的精确性。开展振动影响下立管内部两相流流场的研究工作,从静止与振动管道对比,不同振动幅度和振动频率对比等角度分析总结了流场的特征变化规律。

最后,为更加贴合工程应用实际,开展倾斜管道和不同粒子参数对流场影响的研究工作。在倾斜管道研究中,不但考虑了倾斜角度的影响,也分析了不同振动方向的区别。

综上,本文基于 MPS-DEM 耦合方法对振荡运动下海洋立管内部流场进行仿真模拟,对流场压力损失,输运速度分布和粒子流态等参数进行分析,并进一步总结了不同工况参数对水力提升系统的影响规律,为优化深海采矿系统提供借鉴和参考。

关键词: MPS 方法, DEM 方法, 海洋立管, 两相流, 振荡运动



21002867



ABSTRACT

At present, the collection and transportation of seabed minerals are mainly achieved by hydraulic lifting systems based on floating platforms, which mainly consist of mining vehicles, pumps, risers, transport ships, and other parts. As the main body involved in hydraulic transportation, in the scenario of deep-sea mining, the riser is affected by shear flow externally and generates shedding vortices along the surface of the riser, resulting in the formation of an unstable wake area around it and the generation of fluid forces. The riser undergoes reciprocating displacement and oscillatory motion under the action of fluid force. The oscillation of the riser can greatly affect the characteristics of the internal flow field of the pipeline. Conducting research on the internal flow field of the riser under the influence of oscillation is of great significance for obtaining a series of parameters that affect the efficiency of the system, such as pressure loss and transportation rate.

This paper is mainly based on the coupling method of moving particle semi-implicit (MPS) and discrete element method (DEM) and uses MPSDEM-SJTU solver to simulate the solid-liquid two-phase flow field in the riser under various working conditions. The coupling method is meshless particle method, MPS is used to simulate the liquid phase, DEM is used to simulate the solid phase, and the collision between solid particles and pipe wall and solid particles can be calculated. It is no need for meshing, suitable for large Reynolds number flow fields. The main work of this article is as follows:

Firstly, introduced the calculation method used in this article for two-phase flow field, including liquid phase, including liquid phase numerical models, solid phase numerical models, and solid-liquid two-phase interaction models. On this basis, the architecture of the MPSDEM-SJTU solver and the boundary conditions of the physical model were introduced, and the vibration mode of the pipeline was analyzed.

Then, verify the accuracy of the solver in pipeline flow field calculations. We conducted research on the two-phase flow field inside the riser under the influence of vibration, analyzed and summarized the characteristic changes of the flow field from the perspectives of comparing static and vibrating pipelines, comparing different vibration amplitudes and frequencies.



Finally, to better fit the practical application of engineering, research on the influence of inclined pipelines and different particle parameters on the flow field be carried out. In the study of inclined pipelines, not only the influence of inclination angle was considered, but also the differences in different vibration directions were analyzed.

To sum up, this paper simulates the internal flow field of riser under the influence of vibration based on MPS-DEM coupling method, analyzes the parameters such as the pressure loss of the field, the effects of different working conditions on the hydraulic lifting system are further summarized to provide a reference for the optimization of the deep-sea mining system.

Key words: MPS method, DEM method, marine risers, Oscillatory motion



目 录

摘 要.....	I
ABSTRACT	III
第一章 绪论.....	1
1.1 研究背景与意义.....	1
1.2 国内外研究现状.....	3
1.2.1 管道振动	3
1.2.2 管道流场	6
1.3 本文主要工作与创新点.....	13
第二章 数值方法.....	16
2.1 液相数值方法.....	16
2.1.1 控制方程	16
2.1.2 预估-修正方法	16
2.1.3 粒子相互作用模型.....	17
2.1.4 压力 Poisson 方程	19
2.1.5 自由面检测方法.....	20
2.2 固相数值方法.....	20
2.2.1 运动方程	20
2.2.2 碰撞模型	21
2.3 固-液相互作用模型	23
2.3.1 模型原理	23
2.3.2 水动力方程.....	24
2.3.3 耦合方法计算流程.....	26



2.4 数值模拟设置	27
2.4.1 时间步长设置	27
2.4.2 管壁边界条件	28
2.4.3 出入口边界条件	28
2.4.4 模型参数设置	29
2.5 本章小结	30
第三章 振荡影响下垂直管道数值模拟	31
3.1 数值验证	31
3.2 管道振动形式	33
3.3 静止与振动立管对比分析	34
3.4 不同振幅对立管流场影响	44
3.5 不同周期对立管流场影响	48
3.6 本章小结	53
第四章 粒子参数对立管流场影响分析	55
4.1 不同固体粒子浓度影响分析	55
4.2 不同固体粒子直径影响分析	59
4.3 本章小结	63
第五章 振荡影响下倾斜管道数值模拟	65
5.1 静止倾斜管道数值模拟研究	65
5.2 静止与振动倾斜管道对比分析	69
5.3 不同振动方向对倾斜管道流场影响	72
5.4 本章小结	75
第六章 总结与展望	77
6.1 总结	77
6.2 展望	78



21002867

参 考 文 献.....	80
攻读学位期间学术论文和科研成果目录	87
致 谢	88



图 录

图 1-1 采矿系统示意图.....	1
图 1-2 涡激振动示意图 ^[1]	2
图 1-3 剪切流实验示意图.....	4
图 1-4 圆柱体振动预测模型.....	5
图 1-5 涡激振动数值模拟.....	6
图 1-6 管道内流实验.....	7
图 1-7 双流体模型数值模拟.....	9
图 1-8 海底滑坡数值模拟.....	9
图 1-9 CFD-DEM 数值模拟管道两相流.....	10
图 1-10 MPS 方法数值模拟流场.....	11
图 1-11 振动对管道流场影响.....	12
图 1-12 振动管道压力损失.....	13
图 1-13 本文主要工作.....	14
图 2-1 预估-修正法	17
图 2-2 自由面检测.....	20
图 2-3 软球模型.....	21
图 2-4 流-固耦合作用	24
图 2-5 耦合方法计算流程.....	26
图 2-6 求解器架构.....	27
图 2-7 管壁边界条件.....	28
图 2-8 出入口边界条件.....	28
图 2-9 物理模型.....	29
图 3-1 泊肃叶流计算模型.....	31
图 3-2 液体粒子速度.....	31
图 3-3 数值方法与解析解对比.....	32
图 3-4 固体粒子速度分布对比.....	33
图 3-5 单粒子运动轨迹.....	34
图 3-6 初始时刻流场发展情况.....	35



图 3-7 不同工况粒子流态对比图	36
图 3-8 管道截面粒子分布图	37
图 3-9 径向距离粒子体积分数图	37
图 3-10 压力损失变化图	38
图 3-11 固相在管道截面速度分布图	39
图 3-12 液相在管道截面速度分布图	39
图 3-13 管道内固体粒子速度分布图	40
图 3-14 管道内固体粒子速度分布图	41
图 3-15 管道内固体粒子微团运动图	42
图 3-16 固体粒子输运速率变化图	43
图 3-17 固体粒子角速度变化图	43
图 3-18 不同振幅粒子流态图	44
图 3-19 不同振幅固体粒子体积分数图	45
图 3-20 不同振幅固相速度云图	46
图 3-21 不同振幅压力损失变化图	46
图 3-22 不同振幅固体粒子输运速率变化图	47
图 3-23 不同振幅角速度变化图	47
图 3-24 不同周期粒子流态图	49
图 3-25 不同周期固体粒子体积分数图	49
图 3-26 不同周期流场压力损失图	50
图 3-27 不同周期固相速度分布云图	51
图 3-28 不同周期固体粒子输运速率变化图	51
图 3-29 管道流场示意图	52
图 3-30 不同周期固体粒子速度变化图	52
图 3-31 不同周期固体粒子角速度变化图	53
图 4-1 三维管道流场示意图	55
图 4-2 不同浓度粒子流态图	56
图 4-3 不同浓度压力损失变化图	57
图 4-4 不同浓度固体粒子速度分布图	58
图 4-5 不同浓度固体粒子角速度分布图	59
图 4-6 不同浓度固体粒子输运速率图	59
图 4-7 不同粒径管道流场图	60



图 4-8 不同粒径管道粒子流态图.....	61
图 4-9 不同粒径流场压力损失图.....	62
图 4-10 不同粒径粒子出口平均速度对比图.....	62
图 4-11 不同粒径输运速率对比图.....	63
图 5-1 倾斜管道物理模型.....	65
图 5-2 不同初始时刻粒子分布发展.....	67
图 5-3 不同倾角管道粒子流态图.....	68
图 5-4 固体粒子的速度与分布情况.....	69
图 5-5 固体粒子的角速度分布图.....	69
图 5-6 计算模型.....	70
图 5-7 静止与振动管道粒子流态.....	70
图 5-8 固体粒子速度分布图.....	71
图 5-9 固体粒子速度云图.....	71
图 5-10 固体粒子径向速度概率分布.....	72
图 5-11 不同振动方向粒子流态.....	73
图 5-12 不同振动方向固体粒子速度分布图.....	74
图 5-13 不同振动方向固体粒子体积分数分布图.....	74
图 5-14 不同振动方向固体粒子输运速率变化.....	75



表 录

表 1-1 管道流场研究方法..... 7

表 1-2 数值模拟方法..... 8

表 2-1 粒子计算参数..... 29

表 3-1 实验参数..... 32

表 3-2 计算参数..... 34

表 3-3 不同振幅实验参数..... 44

表 3-4 不同周期实验参数..... 48

表 4-1 不同浓度工况..... 55

表 4-2 不同粒径工况..... 60

表 5-1 不同倾斜角度工况..... 65

表 5-2 静止与倾斜工况设置..... 70

表 5-3 不同振动方向设置..... 73



21002867



第一章 绪论

1.1 研究背景与意义

海洋底部蕴藏着丰富的矿物，包括锰结核、砂石矿和含金属泥沉积物等。上世纪以来，随着对海洋资源的不断探索，一批深海矿产资源开发装备逐渐涌现。其中图 1-1 所示系统应用最广，其主要由三部分组成：海底采矿系统，提升系统和浮式建筑物。海底机器人按照既定轨迹进行矿物开采，将矿物结核破碎到符合输运要求，并输送到矿物输送系统。输送系统有两种运输方式：使用水和空气，但后者效率较低，目前多用水力提升方式进行海底矿物的输运，水力提升系统由泵、立管等部分组成，其中立管是系统的主体部分，也是矿物输运的主要承载体，本文主要针对立管内部流场和外部影响进行研究分析。

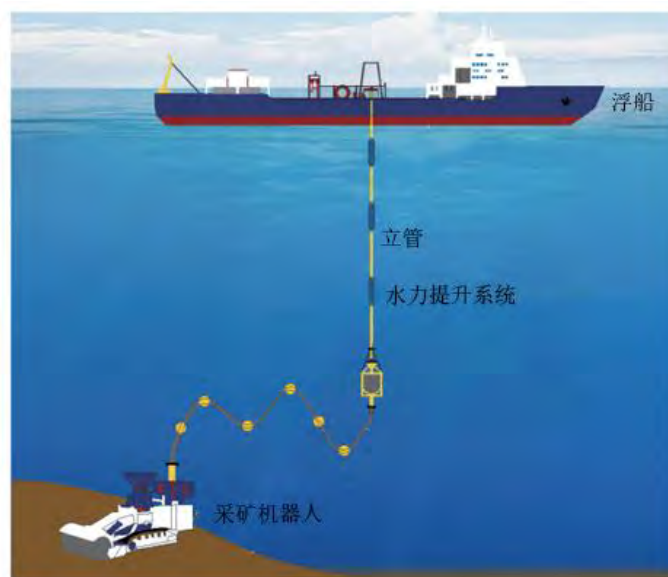


图1-1 采矿系统示意图

Fig. 1-1 Mining system

管道振动是在采矿工程实际中常见的现象，主要的产生原因是流体力作用的结果。当海洋立管这类细长圆柱体受到海洋剪切流的影响时，管道受到流体力作用发生往复位移，流场在管道表面后部形成周期性的脱落涡，如图 1-2 所示^[1]。管道在外部影响



和内部流场影响下发生振动,当脱落涡频率与管道本身固有频率一致时,发生“锁振”现象,此时管道的振幅最大。立管的振荡运动现象是一种复杂的问题,其不仅对管道的结构具有威胁,也极大影响着管道内部的流场和立管输运效率。目前来说,针对在多种因素影响下管道内部流场的研究有多种不同的方法,其中包括实验方法、经验公式和数值模拟等。

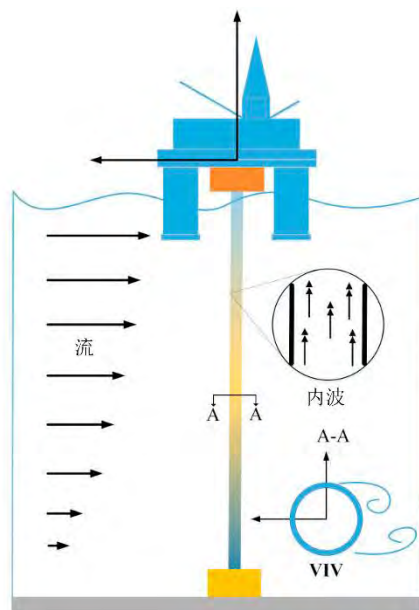


图1-2 涡激振动示意图^[1]

Fig. 1-2 Vortex Induced Vibration

随着对深海采矿装备研发的深入,立管的研究逐渐引起国内外学者的关注,日、韩和我国都建立了立管实验装置^[2],用于对立管性能的研究。海洋立管往往可长达几千至数十千米,其研究场景具有复杂性:一方面,管道流场复杂,立管内部涉及流固耦合问题,液相和固相相互影响,进一步增加了研究的难度。固体颗粒和流场的详细参数难以获得,无法精确评估立管的性能和对水力提升系统效率的影响;另一方面,在管道进行振荡运动的背景下,会对管道内部流场造成剧烈扰流,这使得矿物颗粒运动变得复杂,增加观测和研究难度。粒子流态、输运速率等立管关键参数也受到较大影响,传统凭借试验或经验公式的方法难以应用。在这种情况下,不仅要考虑管道内部两相流流场的研究,也要考虑管道外部振动对管道流场的影响,鉴于目前传统模型试验方法和网格类数值方法的限制,使用新的方法开展研究便变得十分迫切。本文使用无网格类粒子法对立管进行数值模拟,具有成本低,精确度高的优点,为解决上述问题提供了一个新的思路方法。



1.2 国内外研究现状

当前针对立管研究工作主要分为外部影响,立管结构和内部流场三部分。其中外部影响主要指由流体力作用造成的管道位移运动,即部分涡激振动的影响。内部流场主要针对固-液两相流开展研究。对于立管的研究方法主要有模型试验方法、半经验公式和新兴的计算流体力学方法(Computational Fluid Dynamics, CFD)等。在深海采矿的应用背景下,立管长度往往可达到数十千米,且海洋内部流场复杂多变,对实尺度下的试验方法和半经验公式的使用造成了很大的限制。在此基础上,计算流体力学方法凭借成本低,灵活度高,可重复快速计算等优点吸引了国内外学者的广泛关注,并使用该方法在立管性能计算分析领域开展了大量工作。下面将主要通过立管外部影响和内部流场两部分来简要总结国内外的研究现状。

1.2.1 管道振动

立管是连接浮式平台和海底采集装备的主要部件,由于恶劣的操作环境(例如变化的波浪和流动),平台、水流和立管之间的相互作用会产生涡激振动,这是造成管道振荡运动的主要原因^[3]。本节就目前关于立管涡激振动的研究现状进行总结。其作为一种复杂的流固耦合问题,涉及到多频多自由度振动响应。在过去的几十年里,许多国内外专家学者使用不同的研究方法对海洋立管振动的机理及影响振动的参数进行了研究分析。

使用真实立管模型进行海试是获得可靠性数据最直接的手段。2005年,Vandiver等人^[4]在纽约的Seneca湖进行了一项纵横比高达3673的立管涡激振动试验。立管模型的纵横比接近于实际的海洋立管。Srivilairit等人^[5]在深海钻井中监测了1000 m深度处的立管位移速度和海流速度,并对测量数据进行了分析,以此来计算立管的涡激振动。但由于该方法成本高,可行性低,且实验环境不可控,在现有的文献中并不多使用。

为解决全尺度试验的缺点,使用水池进行的缩尺试验被广泛应用。Chaplin^[6]模拟了通过刚性立管的横流,并总结了近年来开展的试验,其发现为了保持数据的准确性,立管模型的纵横比不应小于500。这个长宽比实际上太大,现有的设备无法实现,只有少数测试可以达到这个标准,如Vandiver和Song等人^[7-9]。Capell等人^[10]研究了水面附近圆柱的涡激振动特性,并发现了一个具有两种振动模式的振动区域,即“lock-in vibration”和“non-zero vibration”。为了得到剪切流,Trim等人^[11]使用机器沿一个方向牵引重物,以形成线性剪切流,如图1-3(a)所示。Lie等人^[12]将立管模型连接



到浮船上, 并使用绳索系统拉动装置来形成剪切流。在图 1-3 (b) 中, 通过浮筒维持立管张力, 并通过恒速移动顶部装置使立管所受流速分布为三角形区域。Che 等人^[13]通过将圆柱体的下部浸入均匀流中同时将上部保持在静水中来实现阶梯流, 如图 1-3 (c) 所示。

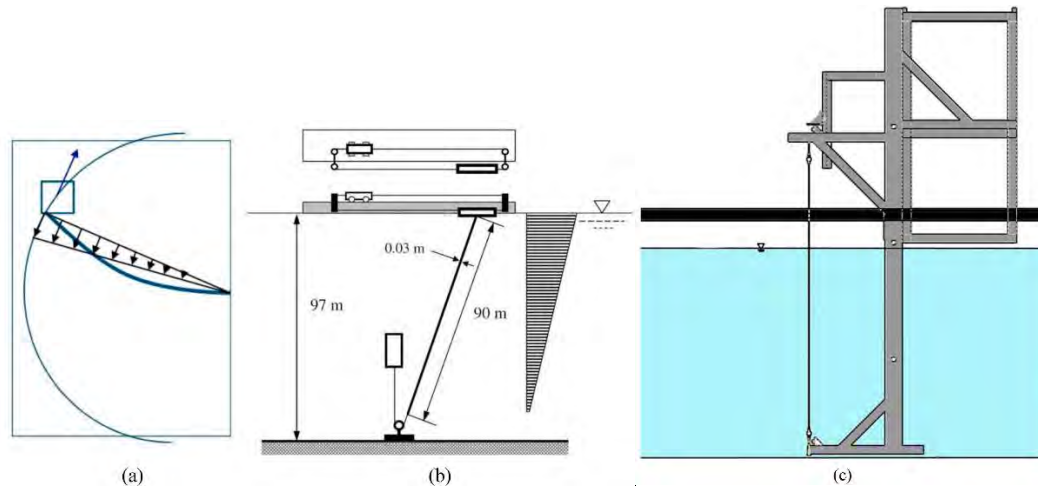


图1-3 剪切流实验示意图

Fig. 1-3 Test schematics shear flow

除试验外, 还有必要建立一个能够准确预测涡激振动的模型, 目前有两种主要的方法来预测涡激振动, 即半经验方法和 CFD 方法。半经验方法可以通过海洋涡激振动的结构和试验获得的水动力参数来建立数学模型, 进而预测涡激振动。CFD 方法可以计算沿着结构分布的流体力, 并以此预测立管的振荡运动^[14]。1964 年 Bishop^[15]提出用尾流振子来模拟绕圆柱的尾流运动。1970 年, Hartlen 和 Currie^[16]建立了尾流振子模型。该模型能够可靠地预测立管涡激振动的某些特性。此外, 由于半经验模型能够解决三维流场问题, 因此可以在实践中应用^[17]。Srinil^[17]提出了一种低阶流固耦合模型来计算柔性弯曲和线性圆柱体的非线性多模态涡激振动响应。Srinil^[18]开发了一个时域分析模型, 用于预测线性剪切流中变张力管道涡激振动。为了研究非线性条件下海洋立管的涡激振动, Thorsen 等人^[19]将半经验模型与非线性有限元模型相结合, 模拟了海洋立管在振荡流中的动态响应。Gao 等人^[20]提出了一种基于尾流振子模型的深海长柔性立管涡激振动预测方法, 结果显示剪切流中立管顶部和中部的振动以驻波和行波为主。Wang 等人^[21]通过与以前的研究比较发现, 时域分析方法可以准确地预测稳定流和不稳定流中的振动。Xue 等人^[22]提出了阶梯流和剪切流作用下海洋立管横流振动的时域预测模型。Pang 等人^[23-24]也提出了不同的时域预测方法来拟合数据, 并预测了不同工况下涡激振动的振动响应和模态特性, 立管的结构振动模型由欧拉-

伯努利梁假设,如图 1-4 所示。Yang 等人^[25]通过具有 Kelvin-Voigt 粘弹性特性的全耦合三维非线性动力学模型研究了 VIV, 并寻找合适的粘弹性系数。

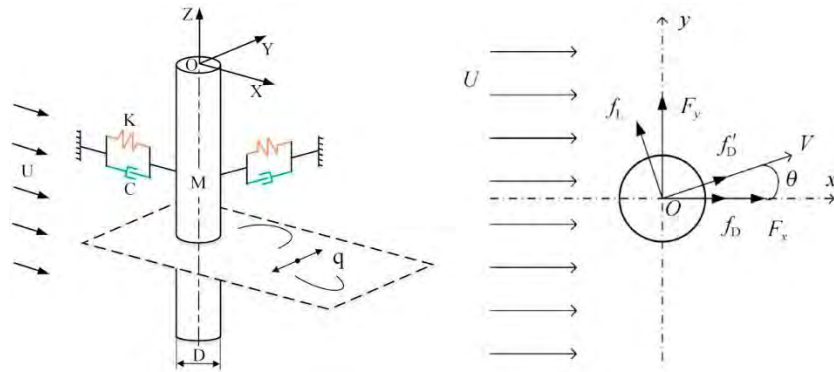


图 1-4 圆柱体振动预测模型

Fig. 1-4 Prediction model for cylindrical vibration

随着计算机技术的快速发展,使用 CFD 方法解决海洋立管复杂的流固耦合问题成为热点。基于 CFD 的湍流求解方法可分为:直接数值模拟(DNS)、雷诺平均 Navier-Stokes(RANS)、大涡模拟(LES)等方法。Bourguet^[26]研究了浸没在线性剪切流中的长拉伸梁的涡激振动,雷诺数范围为 110 至 1100。Khan^[27]利用 RANS 方程对高雷诺数圆柱体的振荡运动进行了数值模拟,并通验证了该方法的有效性。Wang 和 Xiao^[28]计算了海洋立管在均匀流和线性剪切流作用下的涡激振动。Jung^[29]和 Guo 等人^[30]在亚临界雷诺数下数值模拟了弯曲圆柱的涡激振动,发现与光滑圆柱相比,振动现象明显减弱。Guo 等人^[31]使用 LES 方法研究了不同设计参数对纤维增强复合材料立管涡激振动的影响。Jiang 等人^[32]开发了 VIV-FOAM-SJTU 求解器,用于模拟海洋平台的涡激振动,如图 1-5 所示。Sun 等人^[33]提出了一种研究柔性涡激振动的离散涡方法,三维动力学采用有限体积法和增量法计算。Lin 和 Wang^[34]提出了一种基于离散涡方法和有限元方法的方法来预测长柔性管道的振动形式,数值模拟结果与实验结果有较好的吻合度。Wang 等人^[35]使用三维 CFD 方法研究了雷诺数为 500 时不同固有频率对圆柱体涡激振动的影响。Matin Nikoo 等人^[36]使用双向流固耦合 CFD 模型进行了三维模拟。结果显示,管中管模型具有良好的振动抑制效果,并且在响应幅度最大时时抑制效果达到最大。Martins 等人^[37]也进行了管道的三维数值模拟,研究雷诺数和阻尼对涡激振动响应的影响。

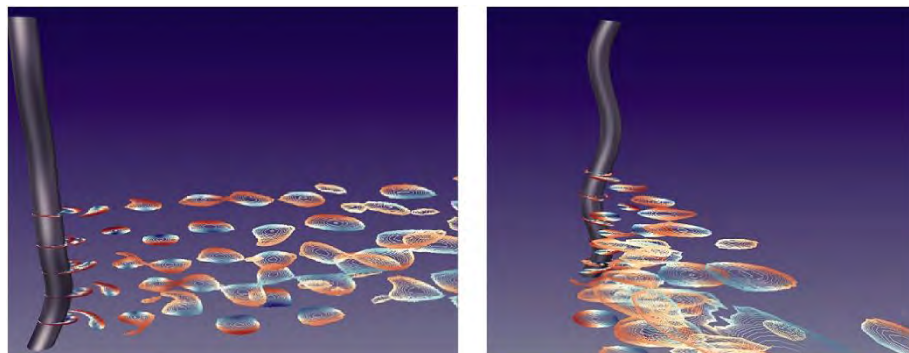


图1-5 涡激振动数值模拟

Fig. 1-5 Numerical simulation of vortex induced vibration

雷诺数, 管道布置, 平台以及管道内流都会对管道的振动产生影响。Wanderley 和 Soares^[38]发现雷诺数对低质量阻尼系统的振幅、频率和相位角有很大影响。数值结果表明, 雷诺数范围越大, 振幅比越高, 锁振区的响应频率越接近立管固有频率。Ding 等人^[39]对三个串联圆柱体进行了流致振动实验研究。结果表明, 上游立管对下游立管振动产生扰动, 导致下游立管振动幅值减小。Thorsen 等人^[40]数值模拟了管道内部流对海上平台振动的影响。

立管在海洋中的振动现象十分复杂, 管道的参数众多, 在研究工作中, 需要针对特定工况进行分析计算。当前的研究主要针对外部环境及内部流变化对振动的影响, 较少涉及振动对管道流场的变化影响, 因此开展振动影响下流场研究有很大的必要性。

1.2.2 管道流场

管道的内部流场是深海采矿输运系统研究中的一个重要课题^[41]。由于深海作业环境的特殊性和复杂性, 很难直接操纵相关采矿设备并进行昂贵的现场测试^[42], 现有的研究管道内部流场方法主要有模型实验、半经验公式和数值模拟三种, 如表 1-1 所示。其中模型实验精度良好, 但花费高, 无法获得详细的流场信息。而半经验公式难以被广泛应用到一般性的流场问题中。相比而言, 可重复性高的计算机建模与仿真逐渐成为深海采矿系统研究的常用手段。

模型实验是指通过搭建试验台模拟管道流动的方法, 并使用一系列新的检测方法如层析成像^[43], 电学方法, 声学方法^[44]和采用高速摄影的粒子图像测速技术 (PIV)^[45]等获得管道内部流场信息。其中层析成像具有分辨率低和后处理繁琐的缺点。电和声学方法已被证明是有效的方法。He 等人^[46]采用声发射 (AE) 检测两相输送过程中流场的变化, 并分析了颗粒壁接触模式和固体质量通量。PIV 技术作为一种无干扰、

瞬态和全场速度测量方法，已广泛应用于气固和气液两相流问题中。Zheng 等人^[47]使用 PIV 获得了带软翅片的水平输送管道中最小输送速度附近的颗粒脉动速度，并进一步揭示了颗粒脉动速度的多尺度特性。Santo Nir^[48]使用高速摄影全面分析了水平和垂直管道中加速和稳定状态下的颗粒运动，如图 1-6 所示，可以较为清晰看到矿物颗粒在管道内的运动情况。同样，Yu^[49]通过实验观测了固体颗粒的流量变化情况。Matousek^[50]测量了管道上下端压力变化情况，并计算出由固体碰撞导致的压力损失变化。

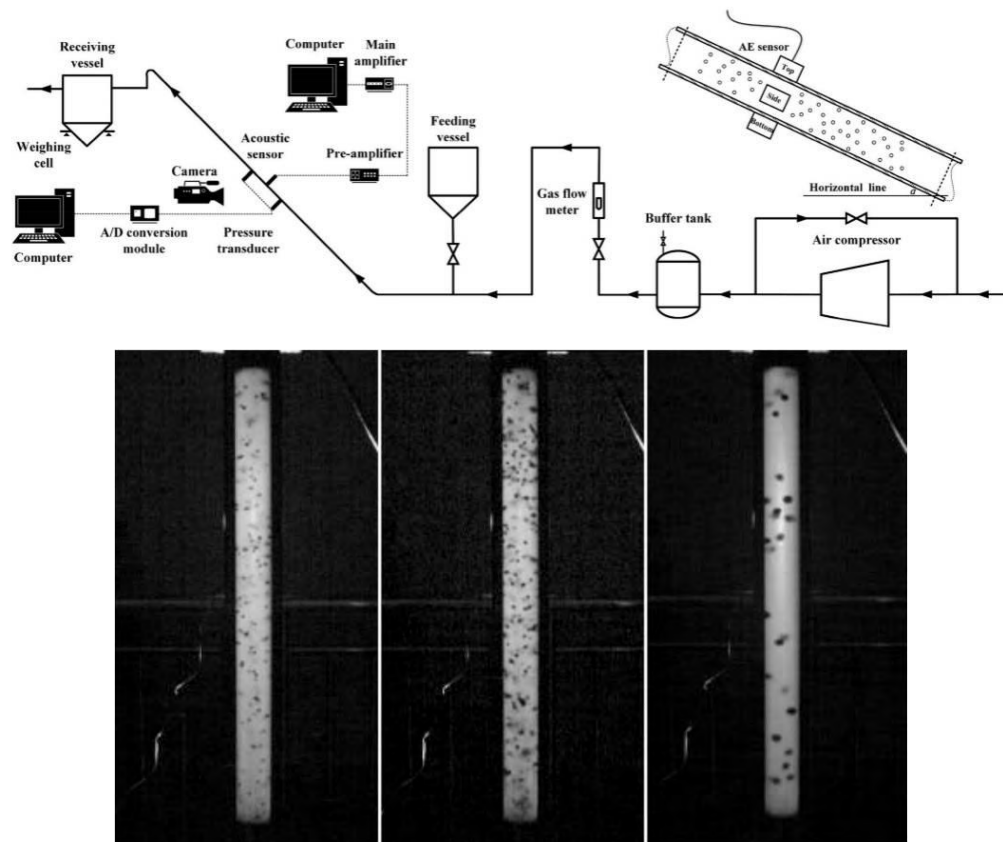


图1-6 管道内流实验

Fig. 1-6 Pipeline Internal Flow Experiment

表1-1 管道流场研究方法

Table 1-1 Research methods for pipeline flow field

方法	优势	劣势
模型实验	可靠性高	成本高，周期长
半经验公式	节省时间	普适性低
数值模拟	成本低，可重复性高	依赖计算机性能



对于管道内部流场参数的预测,也有一些半经验公式的应用,但这方面工作较少。比较具有代表性的是 Wasp^[51]提出的用于预测固体颗粒沉积速度的公式,如公式(1-1)所示。

$$V_D = 4\left(\frac{d_p}{D_p}\right)^{\frac{1}{6}} C^{\frac{1}{5}} \sqrt{2|g|D_p\left(\frac{\rho_p}{\rho_f} - 1\right)} \quad (1-1)$$

式中, d 为粒径, C 为固体输运体积分数, p 和 f 分别代表流体和固体。

随着计算技术的发展,数值模拟已成为预测水力输送过程流动特性的有效工具。目前,应用于两相流的数值模型大致分为三种,如表 1-2 所示。分别为:欧拉-欧拉模型^[52],欧拉-拉格朗日模型和拉格朗日-拉格朗日模型^[53]。其中,欧拉-欧拉模型即双流体模型^[54],将固体也视为连续相模拟,计算速度快,但无法获得更详细的固相信息。欧拉-拉格朗日模型和拉格朗日-拉格朗日模型均可以获得较为详细的流场信息。

表1-2 数值模拟方法

Table 1-2 Numerical Simulation Methods

数值模型	特点
欧拉-欧拉	计算速度快,精度低
欧拉-拉格朗日	可捕捉固体信息,受限于网格精度
拉格朗日-拉格朗日	精度高,不受网格限制,计算速度慢

欧拉-欧拉方法通过引入相体积分数的概念,将不同的相视为可以相互穿透的连续相,它包括多个不同的数值模型^[55]。近年来,已开展了多个使用双流体模型对管道流场建模研究的工作。Ekambara 等人^[56]基于颗粒流的动力学理论开发了瞬态 3D 流体动力学模型,分析水平管道固液两相流流场。Kaushal 等人^[57]利用单独的欧拉和混合物两相模型来模拟直管中的细颗粒和高浓度浆体颗粒流。他们发现欧拉模型在预测管道压降和固体浓度方面有一定的优势。Wang 等人^[58]使用基于 CFD 的欧拉多相模型研究了冰-浆流。Kumar 等人^[59]使用欧拉模型模拟了直径为 263 mm 的管道中的砂浆流。Radhakrishnan 等人^[60]验证了一种用于预测不等温冰浆流的综合流体动力学模型,该模型被证明比传统复杂的两相数值模型更有效。Ghoudi 等人^[61]对颗粒体积分数的输运方程进行了预测分析,结果显示,该模型可以用于模拟两相流的流场变化。Zeineb 等人^[62]使用欧拉-欧拉模型数值模拟了不同浓度下水平管道两相流情况,如图 1-7 所示。

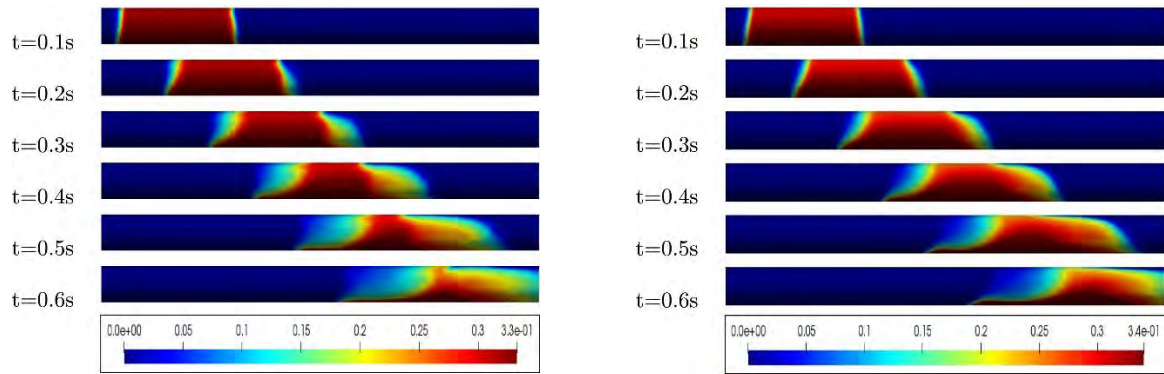


图1-7 双流体模型数值模拟

Fig. 1-7 Numerical simulation of dual fluid model

除管道流场外，双流体模型在其他工程问题中也有诸多应用。Zhang 等人^[63]使用欧拉-欧拉模型数值模拟了海底滑坡现象，如图 1-8 所示，结果验证了数值方法的准确性。Guo 等人^[64]使用低温 Herschel-Bulkley 流变模型来模拟海底泥石流，该模型将海底泥石流视为海水和沉积物的混合物。Abbas 等人^[65]使用欧拉-欧拉两相流模型研究沉积物输运过程，并模拟海底管道中的侵蚀。Xiu 等^[66]采用欧拉-欧拉两相流模型分析了海底泥石流的发展过程。模拟结果能较好地反映实际海底的一些特征，再现泥石流的运动过程。Yu 和 Lee^[67]采用基于流体力学的多相流模型研究了斜面上的小规模水下滑坡，其中考虑了颗粒尺寸等条件的影响。Lee^[68]应用基于流体力学的多相流模型，考虑流体和颗粒的湍流运动，模拟了大规模海底泥石流。

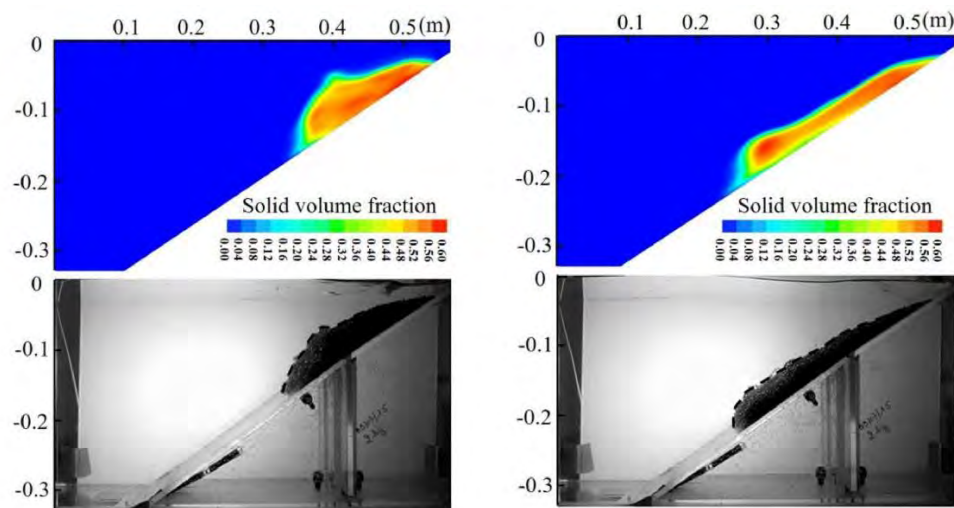


图1-8 海底滑坡数值模拟

Fig. 1-8 Numerical simulation of submarine landslides



欧拉-拉格朗日方法是指使用连续相模拟液体，离散相模拟固体的一种方法。具有代表性的为 CFD-DEM 耦合方法，与双流体方法不同的是，CFD-DEM 方法可以捕捉流场内固体粒子的运动和受力等参数，这为进一步分析流场的具体特征提供了保障。Dai 等人^[69]通过将 Fluent 与 EDEM 软件进行耦合，数值模拟了立管内部固-液两相流问题，如题 1-9 所示，可以清晰看到不同初始速度下管道内部固体颗粒的流动状态。

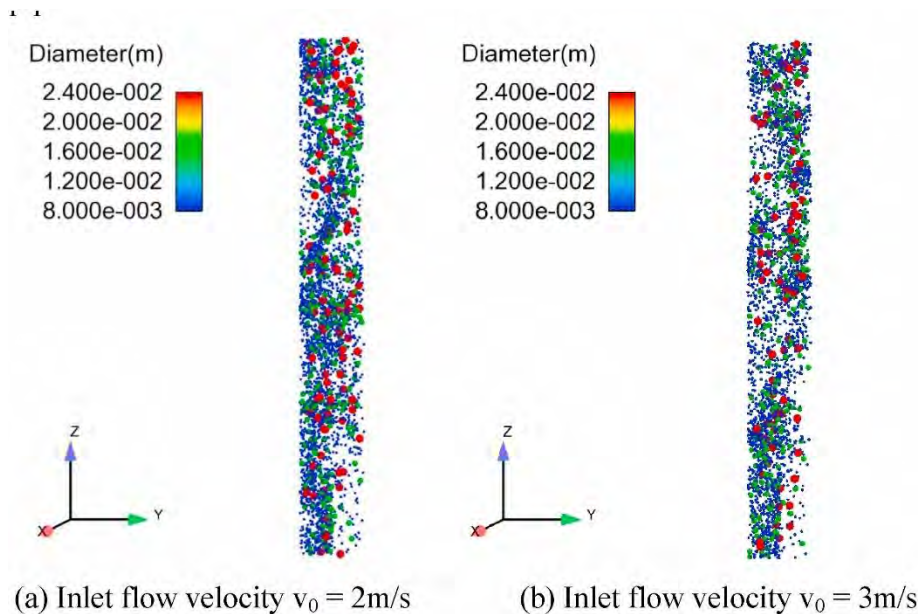


图1-9 CFD-DEM 数值模拟管道两相流

Fig. 1-9 CFD-DEM numerical simulation of two-phase flow in pipelines

Chen 等人^[70]使用 CFD-DEM 方法研究了水力管道输送中不同颗粒形状和不同体积浓度对液体流动效率和流动特性的影响。Kloss 等人^[71]提出一种多功能 CFD-DEM 框架，并验证了该方法适用于固-液两相流模拟计算。Blais 等人^[72]开发了一种 CFD-DEM 模型，结合 LES 方法解决了固-液流场相关问题，并使用该模型研究了流体的动力学特性和玻璃颗粒的分布及运动特性。Uzi 等人^[73]使用 CFD-DEM 方法研究了水平管道中不同流速、颗粒浓度、颗粒尺寸和管道尺寸下压力等参数的变化。Li 和 Liu^[74]计算了含结核矿物的固-液两相流在深海采矿管道、提升泵等设备中的流场。Zhou 等人^[75]使用 CFD-DEM 方法，对长径比为 21.8 和 14.9 的水平管道中粗颗粒水力输送的流态和相应的压力梯度进行了数值研究，并提出了一种作用在颗粒上的力的函数。Zhou 等人^[76]数值研究了 $8.0 \leq \text{长径比} \leq 13.2$ 时粗颗粒通过垂直管道的水力输送。计算结果显示，颗粒分布的压降和分散度随着流体速度的增加而增加，并且流态和压降不依赖于颗粒的直径。

然而, CFD-DEM 方法也有一定缺陷, 其对网格质量有较高的要求, Liu 等人^[77]采用源平滑方法改善了这一点, 但对于剧烈扰动的高雷诺数流场, 与实验结果相比仍有不小的误差。为了解决这一问题, 无网格类粒子法被开发出来, 如 MPS 和 DEM 方法等, 这种基于拉格朗日的数值方法不受网格质量的限制, 在处理大自由面和剧烈流动问题中有着天然的优势, 其没有网格质量的需求, 但流体粒子的大小会影响计算精度, 本文使用的粒子大小为 0.005m, 在以往的工作中已经进行了收敛性验证。1996 年, Koshizuka 和 Oka^[78]为了解决核工程的流体动力学问题, 开发了 MPS 方法。由于采用了预测-校正半隐式方案, MPS 在稳定性方面优于原始 SPH^[79], 目前该方法已被广泛应用到了船舶与海洋工程领域中的流体力学问题中。Wen 等人^[80]采用单相 MPS 和 MMPS 来模拟剧烈晃动流场, 如图 1-10 所示, 其较好模拟了大自由液面破浪破碎的过程。

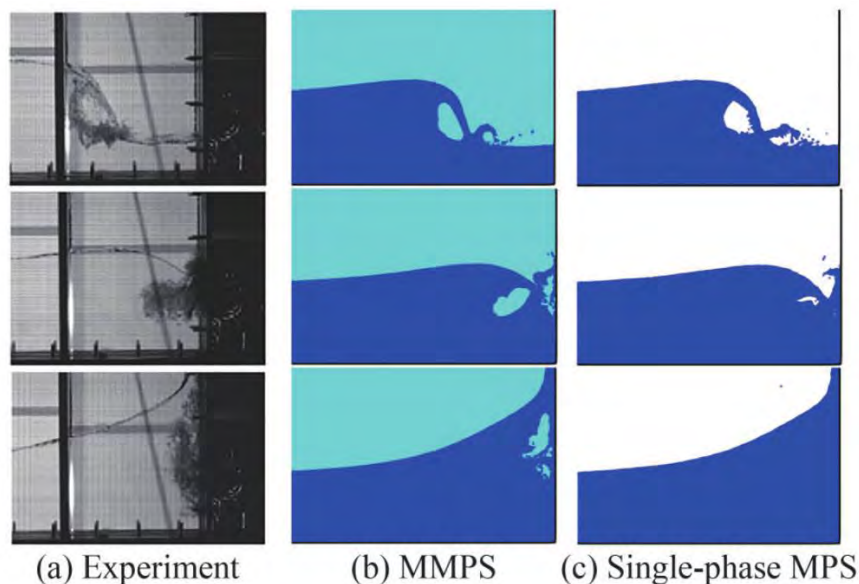


图1-10 MPS 方法数值模拟流场

Fig. 1-10 Numerical simulation of flow field by MPS method

离散元法作为一种完全的拉格朗日方法, 可以用来求解不连续固体颗粒的运动问题。因此, 将 MPS 方法与 DEM 方法结合成为研究两相流问题的一个新方向。Duan 等人^[81]开发了一个 MPS-DEM 模型, 用于模拟核工程领域的碎片重熔。Sakai 等人^[82]开发了一个 2D MPS-DEM 模型。Li 等人^[83]将 WCMPS-DEM 耦合方法扩展到非牛顿固液流场。Huang 和 Zhu^[84]通过提高压力稳定性优化了 MPS 方法, 并模拟了孤立波对海岸的影响。Suzuki 和 Hotta^[85]将泥沙视为粘性流体, 引入多相流 MPS 方法实现流

体与泥沙的相互作用。Guo 等人^[86]将 MPS 与离散单元法 (DEM) 相结合,成功地模拟了溃坝时坝体的运动和河床泥沙运动。

在静止管道的基础上,近年来专家学者对振荡运动下的管道内部流场开展了数值模拟研究工作。主要分为两部分,首先针对立管受到的水动力作用分析,得到管道的振动模态的形式。其次引入振动对管道内部流场进行模拟研究。Liu 等人^[87]简化了水流作用下管道的振动方式,提出位移沿管道长度变化公式,并使用双流体模型对柔性立管中固-液混输流场进行了数值模拟分析,如图 1-11 所示。

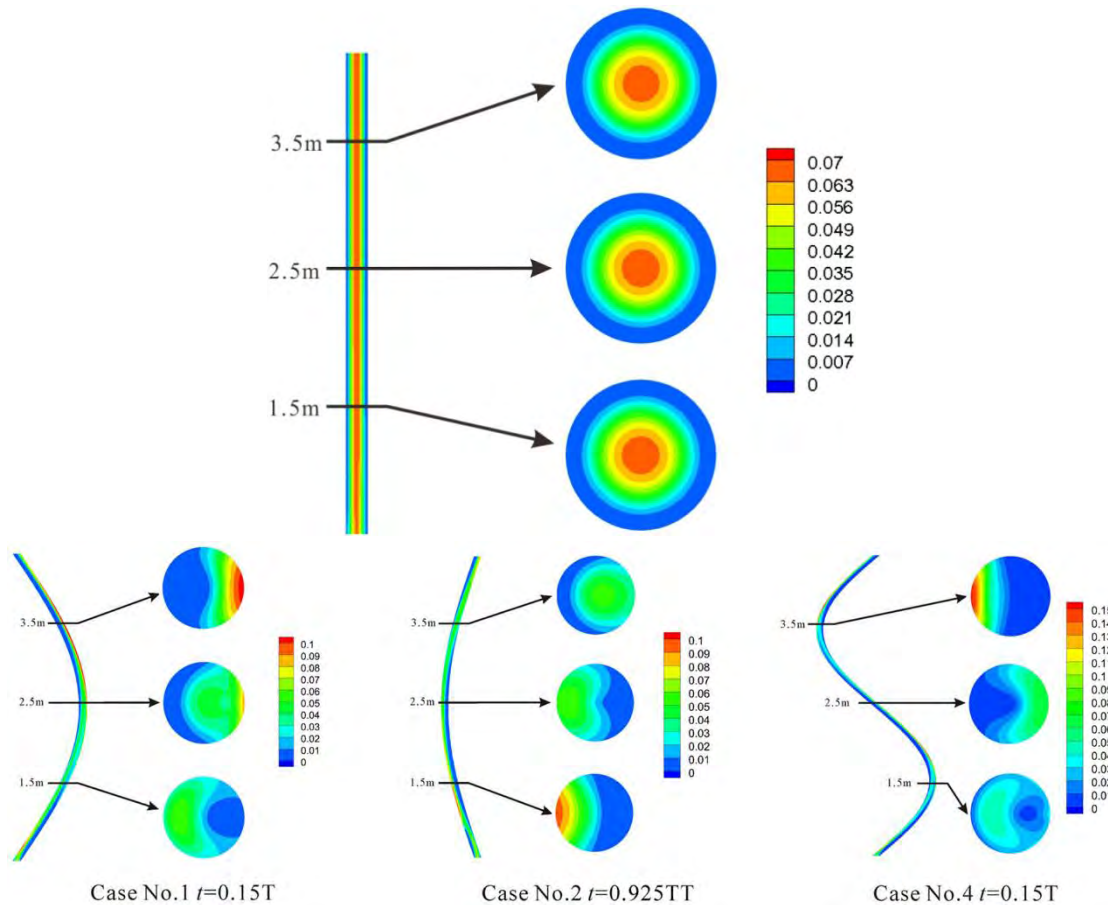


图1-11 振动对管道流场影响

Fig. 1-11 Impact of vibration on pipeline flow field

Yuan^[88]测量了振动管道中固-液两相流的压力损失,发现其流场压力损失大于不发生振动管道中的数值。Zhao 和 Xia^[89]在他们的实验中也发现了这一现象。结果显示,固体颗粒在流场水动力作用下产生横向运动,颗粒与管壁接触的区域增大,造成其轴向冲量减小,压力损失增大。Liu^[90]采用 Euler-Euler 双流体模型对水力提升隔水管中含有粗颗粒的两相流进行了数值模拟,其研究了管道横向振动对流场特征的影响,

数值模拟结果显示, 振动改变了颗粒体积分数的分布, 管道内部局部颗粒体积分数明显增加。刘等人^[91]对弯曲管道中固-液两相流场的压力损失进行了数值模拟, 如图 1-12 所示, 发现振动导致管道压力损失随着时间波动变化。此外, 刘等人^[92]对刚性立管在振荡运动影响下内部流场速度分布进行研究, 发现固相和液相速度分布均随着时间变化, 且最大速度在管壁附近出现。

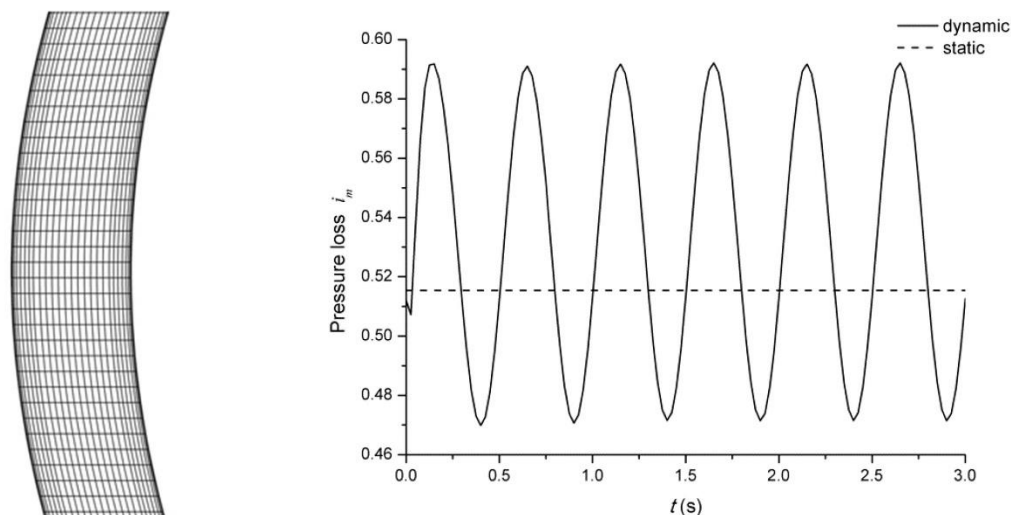


图1-12 振动管道压力损失

Fig. 1-12 Vibration pipeline pressure loss

上文从不同方法角度对当前海洋立管内部固-液两相流问题研究工作进行了简要叙述, 包括模型方法, 半经验公式和数值模拟方法, 并比较了不同方法的特点。结合研究现状来看, 立管内部流场十分复杂, 数值模拟方法可以帮助获得流场内部详细的参数信息。尽管前人针对振动管道的内部流场开展了一些研究工作, 但多数仍使用了双流体方法, 没有给出固体颗粒具体的运动情况。因此, 使用适用剧烈流动流场中的 MPS-DEM 耦合方法开展管道固-液两相流流场研究十分有必要。

1.3 本文主要工作与创新点

本文基于 MPS-DEM 耦合方法, 使用 MPSDEM-SJTU 求解器对振荡运动下海洋立管内部两相流问题开展研究工作, 并对固体粒子流态, 管道压力损失变化, 输运速率和速度分布等一系列影响立管性能的关键参数进行计算分析。其中, MPS 方法模拟管道内部流体, DEM 方法模拟矿物颗粒, 该耦合方法适用于剧烈流动情况。此外,

在静止管道基础上,分析了振荡运动对立管造成的位移影响,并引入到求解器中研究振动对内部流场产生的变化规律。为进一步贴合工程实际,研究分析了倾斜管道发生振动时的流场变化,并对可能出现的不同参数工况进行数值模拟。主要工作内容如图1-13所示。

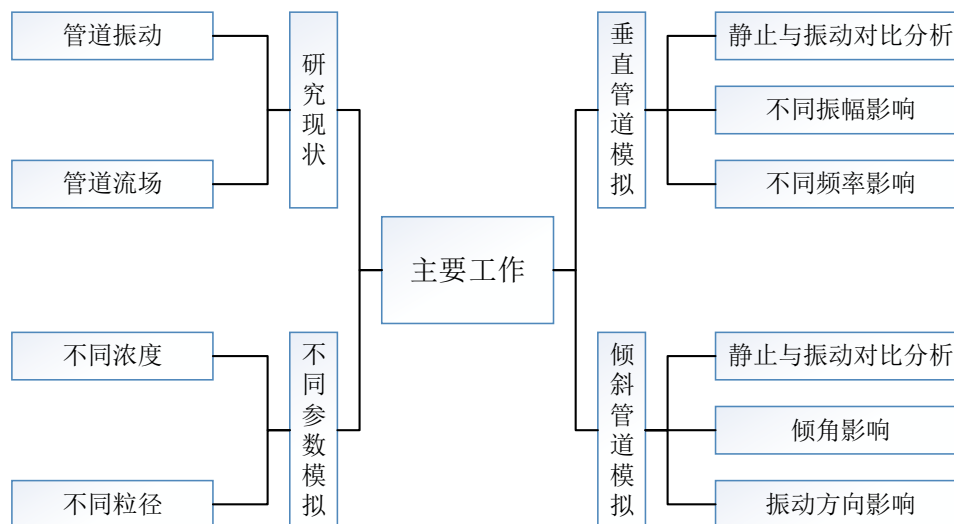


图1-13 本文主要工作

Fig. 1-13 The main work of this paper

(1) 管道水利提升数值模拟精度验证。为保证 MPSDEM-SJTU 求解器在计算高雷诺数下固-液两相流问题中的精度,本文进行了两组工况的实验验证。首先对无矿物颗粒时管道内部液体流速分布进行验证,即泊肃叶流中固体粒子速度分布的对比分析。其次以固体颗粒子的输运速度为参考,与静止管道水利提升矿物颗粒试验进行对比。两组数值模拟算例均较好地符合实验结果。

(2) 垂直管道数值模拟研究。首先是静止管道与振动管道内部流场的特征对比,具体分析矿物颗粒流态变化,管道压力损失,体积分数变化,粒子分布以及固相和液相速度分布等关键参数,从定性和定量两个角度对比分析振荡运动造成的影响。在此基础上,考虑立管在海洋中不同的振动形态,对不同振幅和不同振动周期工况下的管道流场开展数值模拟计算,总结对立管输运性能影响的规律。

(3) 不同粒子参数工况数值模拟研究。由于泵性能,采矿机器人破碎效果和矿物进入立管时状态的不同,开展不同固体粒子浓度和不同固体粒子直径工况下管道流场的数值模拟研究。基于前文分析,采用相同振动周期和幅度,对比研究不同参数对矿物输运效果的影响。



(4) 倾斜管道数值模拟研究。在海流作用下,立管不仅在横向发生位移,也会出现倾斜情况,对倾斜管道流场进行数值模拟分析将更加贴合工程应用实际。首先对比静止与振动倾斜管道输运性能。此外,考虑到初始时刻矿物颗粒状态不同,对粒子集中和分散输入两种工况进行计算,分析输运稳定时粒子状态及所需时间情况。其次采用相同振动形态,分析不同管道倾角和管道振动方向对内部固-液两相流场的影响。

本文使用 MPS-DEM 耦合方法研究海洋立管内部固-液两相流的流固耦合问题,该耦合方法为无网格类方法,既具有 CFD 方法成本低,灵活度高的优点,也避免了传统 CFD 方法对网格依赖高,难以处理剧烈流动问题的缺点。本文主要创新点如下:

(1) 使用 DEM 方法模拟矿物颗粒,可以准确获得单颗粒的详细参数,为分析立管输运性能提供更可靠的结果依据。

(2) 在无网格类粒子法基础上,在求解器中引入海洋流体力引起的立管振荡运动,并研究振动对不同工况下立管内部的流场影响,包括垂直管道,倾斜管道等。



第二章 数值方法

本章主要介绍了应用于固-液两相流中的数值模拟方法。在研究工作中，使用课题组自主开发的 MPADDEM-SJTU 求解器，数值计算中采用 MPS 模拟液体，结合 DEM 方法模拟固体颗粒在流场中的运动，并介绍了求解器中使用的自由面检测方法，邻域粒子搜索方法和两相相互作用方法等。此外，描述了管道的边界条件和流场流动原理。关于 MPADDEM-SJTU 求解器的精确性，相关学者已在工程应用中进行了充分的验证，可参考已发表的文献^[93]。

2.1 液相数值方法

2.1.1 控制方程

液相由基于拉格朗日思想的 MPS 方法模拟，其中液体同样被视为离散相，被离散为单个的粒子，其控制方程由两部分组成：质量守恒方程和动量守恒方程，形式如下：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\tilde{\rho}_f) + \nabla(\tilde{\rho}_f \bar{u}) = 0 \quad (2-1)$$

$$\frac{D}{Dt}(\tilde{\rho}_f \bar{u}) = -\nabla p + \varepsilon_f \mu_f \nabla^2 \bar{u} + \tilde{\rho}_f \bar{g} - \bar{f}^{\text{int}} \quad (2-2)$$

$$\tilde{\rho}_f = \varepsilon_f \rho_f \quad (2-3)$$

式中，下标 f 表示 MPS 粒子， ε 是粒子的局部体积分数， ρ 、 u 、 p 、 μ 、 g 、 t 分别表示流体密度，流体速度矢量，压力，动力粘度，重力和物理时间。公式 (2-2) 右端项代表由于固相和液相之间的动量交换而产生的体积力。

2.1.2 预估-修正方法

MPS 方法中使用了预估-修正方法来求解控制方程，通过引入中间速度的方式求解 N-S 方程，其主要分为两步，如图 2-1 所示。首先对流体质点速度进行预估，在第 n 步流体粒子受力，速度等信息的基础上通过公式 (2-4) 计算。第二步为修正步，在计算得到流体压力后，通过公式 (2-5) 求得修正速度。

$$\Delta v^* = \Delta t (f_n + \nu \nabla^2 v_n) \quad (2-4)$$



$$\Delta v' = -\frac{\Delta t}{\rho} \nabla p_{k+1} \quad (2-5)$$

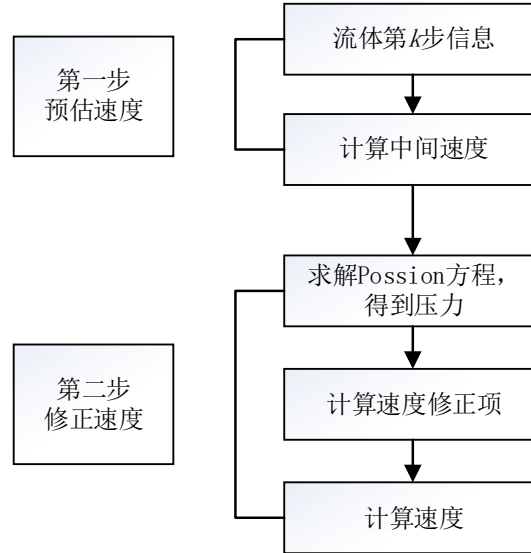


图2-1 预估-修正法

Fig. 2-1 Estimation Correction Method

2.1.3 粒子相互作用模型

在 MPS 方法中, 核函数控制粒子间的相互作用, 它在控制方程的离散过程中起着权函数的作用。在不同问题中, 核函数具有不同的形式, MPS 方法中最常用的核函数之一由 Koshizuka^[94]提出, 如公式 (2-6) 所示:

$$W(r) = \begin{cases} \frac{r_a}{r} - 1, & 0 < r < r_a \\ 0, & r_a \leq r \end{cases} \quad (2-6)$$

式中, r_a 为液体粒子相互作用域半径, r 为两液体粒子间距离。可以看到, 两粒子间距离越小, 权函数越大, 当距离超过作用域半径, 权函数为零。但该方法缺点在于当两粒子间距过小时出现奇点。本文采用 Zhang^[95]提出的可以避免压力振荡的方法, 其形式如下:

$$W(r) = \begin{cases} \frac{r_a}{0.85r + 0.15r_a} - 1, & 0 < r < r_a \\ 0, & r_a \leq r \end{cases} \quad (2-7)$$



坐标 r_i 处的粒子数密度由下式定义:

$$\langle n \rangle_i = \sum_{j \neq i} w(|r_j - r_i|) \quad (2-8)$$

式中, w 为核函数, i 和 j 代表不同的粒子。粒子数密度主要由核函数和各粒子相对原点的位置矢量决定。在该方程中, 粒子 i 不参与粒子密度的计算, 当单位体积中的粒子数由 N 表示时, 公式表现为:

$$\langle N \rangle_i = \frac{\langle n \rangle_i}{\int_V w(r) dv} \quad (2-9)$$

假设粒子具有相同的质量 m , 则流体密度与粒子数密度成正比, 如公式 (2-10) 所示。因此如果粒子数恒定, 则满足连续性方程, 本文用 n^0 描述这个数值。

$$\langle \rho \rangle_i = m \langle N \rangle_i = \frac{m \langle n \rangle_i}{\int_V w(r) dv} \quad (2-10)$$

本文使用梯度模型^[96]、散度模型和拉普拉斯模型来离散粒子间的相互作用。

(1) 梯度模型

两个相邻粒子 i 和 j 之间的梯度向量定义为公式 (2-11) 的形式, ϕ 表示 MPS 粒子所携带的物理量。因此, 我们可以用任意两个粒子的组合来计算梯度向量, 粒子 i 和其相邻粒子 j 之间的梯度向量用核函数加权并平均的形式获得, 如公式 (2-12) 所示。

$$\frac{(\phi_j - \phi_i)(r_j - r_i)}{|r_j - r_i|^2} \quad (2-11)$$

$$\langle \nabla \phi \rangle_i = \frac{d}{n^0} \sum_{j \neq i} \left[\frac{(\phi_j - \phi_i)}{|r_j - r_i|^2} (r_j - r_i) w(|r_j - r_i|) \right] \quad (2-12)$$

式中, d 表示维度向量, 该模型主要适用于 MPS 方法的压力梯度项。

如果粒子 i 正好位于粒子 j 的中心, 则需要引入等式 (2-13) 进行近似处理。这样, 公式 (2-12) 变为公式 (2-14) 的形式:

$$0 = \sum_{j \neq i} \left[\frac{(r_j - r_i)}{|r_j - r_i|^2} w(|r_j - r_i|) \right] \quad (2-13)$$



$$\langle \nabla \phi \rangle_i = \frac{d}{n^0} \sum_{j \neq i} \left[\frac{\phi_j - \phi_i}{|r_j - r_i|^2} (r_j - r_i) w(|r_j - r_i|) \right] \quad (2-14)$$

(2) 散度模型

散度模型基于核函数，MPS 粒子速度矢量，位移矢量和粒子数密度确定。本文使用的散度模型如下所示：

$$\langle \nabla \cdot \bar{u} \rangle_i = \frac{d}{n^0} \sum_{j \neq i} \left[\frac{(r_j - r_i) \cdot (\bar{u}_j - \bar{u}_i)}{|r_j - r_i|^2} w(|r_j - r_i|) \right] \quad (2-15)$$

式中， d 为模型维度， n^0 为粒子数密度， u 代表速度矢量。

(3) Laplacian 模型

Laplacian 算子模型的主要作用为离散二阶导数项，其在 N-S 方程中的黏性项和求解流体压力的过程中起到重要作用，本文使用 Koshizuka^[97]提出的模型，具体形式如公式 (2-16) 所示。在该模型中粒子 i 损失的量正好由粒子 j 获得。

$$\langle \nabla^2 \phi \rangle_i = \frac{2d}{n^0 \lambda} \sum_{j \neq i} \left[(\phi_j - \phi_i) w(|r_j - r_i|) \right] \quad (2-16)$$

式中， d 表示空间维数， λ 是用于使方差增加，进而使结果靠近解析解的参数，其表达形式如下：

$$\lambda = \frac{\sum_{j \neq i} \left[W(|r_j - r_i|) \cdot |r_j - r_i|^2 \right]}{\sum_{j \neq i} W(|r_j - r_i|)} \quad (2-17)$$

2.1.4 压力 Poisson 方程

流场中流体的压力通过求解压力泊松方程 (Pressure Poisson Equation, PPE) 获得。PPE 由左端的 Laplacian 算子和右端的源项组成。本文使用 2011 年由 Tanaka 等人^[98]提出的混合源项方法，其增加了粒子的光顺度，同时也减轻了压力振荡现象。

$$\nabla^2 p_i^{m+1} = (1 - \gamma) \frac{\rho_f}{\Delta t^2} \nabla \cdot \bar{u}_i - \gamma \frac{\rho_f}{\Delta t^2} \frac{\langle n^* \rangle - n^0}{n^0} \quad (2-18)$$



式中, p_i^{m+1} 为第 $m+1$ 步时的流体压力, Δt 是时间步, γ 是数值在 0 到 1 之间的混合参数, 当 $0.01 < \gamma < 0.05$ 时, 压力求解更精确, 且 γ 数值越小, 压力场越平滑, 因此本文使用 $\gamma = 0.01$ 来模拟所有算例工况。

2.1.5 自由面检测方法

在 MPS 方法中, 被判定为自由液面的粒子压力为恒定值, 因此高精度的自由表面检测模型可以提高模拟的稳定性和准确性。本文使用 Marrone 等人^[98]在 2010 年提出的伞形模型, 如图 2-2 所示, 其判定条件如下:

$$\begin{cases} \forall j \in [x_{ji} \geq \sqrt{2}h, |x_{jT}| < h], & b \in S_1 \\ \forall j \in [x_{ji} \geq \sqrt{2}h, (|n_i \cdot x_{jT}| + |\tau_i \cdot x_{jT}|) < h], & b \in S_2 \end{cases} \quad (2-19)$$

式中, n_i 和 τ_i 是自由表面的局部单位法向向量和切向向量。

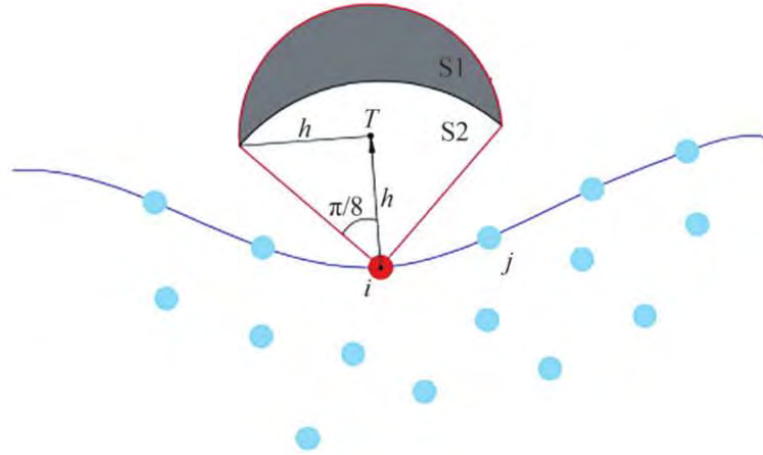


图2-2 自由面检测

Fig. 2-2 Free surface detection

2.2 固相数值方法

2.2.1 运动方程

在 DEM 方法中, 颗粒被建模为离散单元。这种方法可以计算流场中每个粒子的运动信息, 从而模拟流动过程中的每个碰撞事件。其中, 粒子运动由牛顿第二定律计算, 其形式为:

$$m_k \frac{D\bar{v}_k}{Dt} = \sum_n \bar{F}_{c,kn} + m_k \bar{g} + \bar{F}_k^{\text{int}} \quad (2-20)$$

$$I_k \frac{D\bar{\omega}_k}{Dt} = \sum_n \bar{T}_{c,kn} \quad (2-21)$$

式中，下标 k 和 n 代表不同的固体粒子， m_k 是质量， $\bar{F}_k^{\text{int}}$ 是固体所受的力， I_k 是转动惯量， $\bar{\omega}_k$ 是角速度， $\bar{v}_k$ 是位移速度， $\bar{F}_{c,kn}$ 是两颗之间在接触过程中所受到的力， $\bar{T}_{c,kn}$ 是两颗粒在接触过程中的作用力矩。

2.2.2 碰撞模型

本文中固体颗粒之间，以及固体颗粒与壁面之间的接触碰撞过程由软球模型进行模拟^[99]，如图 2-3 所示。该模型由弹簧，阻尼和滑板三部分组成，分别用以模拟接触过程中固体颗粒的弹性形变，碰撞阻尼和接触摩擦力。软球模型允许两粒子重叠，并根据重叠量 δ 的大小计算颗粒所受到的力。

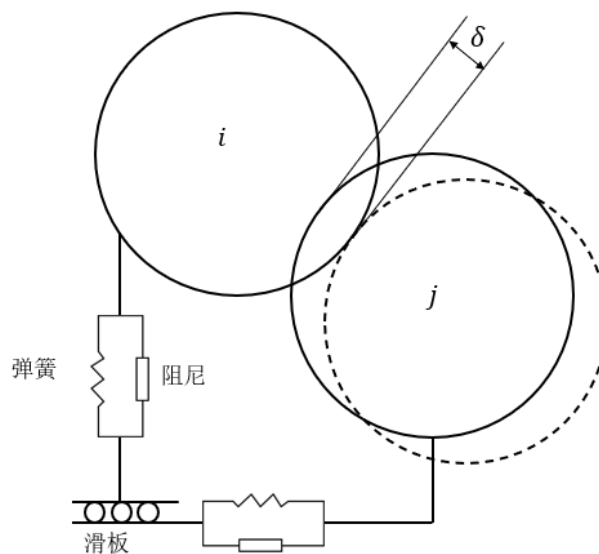


图2-3 软球模型

Fig. 2-3 Soft sphere model

在接触过程中，主要作用力有弹性力和阻尼力，将接触力分解为法向和切向两个部分，其中弹性力的法向和切向分量如下式所示：



$$\vec{F}_{e,kn} = -\frac{4}{3}E^*\sqrt{R^*|\vec{\delta}_{kn}^n|}\vec{\delta}_{kn}^n \quad (2-22)$$

$$\vec{F}_{e,kn} = -8G^*\sqrt{R^*|\vec{\delta}_{kn}^n|}\vec{\delta}_{kn}^t \quad (2-23)$$

式中， $\vec{\delta}^n$ 和 $\vec{\delta}^t$ 分别是两固体粒子间法向和切向上的相对位移。 E^* ， R^* ， G^* 分别表示相互接触的两个粒子的等效杨氏模量、等效半径和等效剪切模量，由以下公式定义：

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1-\nu_k^2}{E_k} + \frac{1-\nu_n^2}{E_n} \quad (2-24)$$

$$\frac{1}{R^*} = \frac{1}{R_k} + \frac{1}{R_n} \quad (2-25)$$

$$\frac{1}{G^*} = \frac{2(2-\nu_k)(1+\nu_k)}{E_k} + \frac{2(2-\nu_n)(1+\nu_n)}{E_n} \quad (2-26)$$

$$\frac{1}{m^*} = \frac{1}{m_k} + \frac{1}{m_n} \quad (2-27)$$

式中， ν_k 是固体粒子的泊松比， E_k 是杨氏模量， R_k 是粒子半径。

阻尼力的法向和切向分量如下所示：

$$\vec{F}_{d,kn} = -2\sqrt{\frac{6}{5}}\psi\sqrt{C_n m^* \vec{v}_{kn}^n} \quad (2-28)$$

$$\vec{F}_{d,kn} = -2\sqrt{\frac{6}{5}}\psi\sqrt{C_t m^* \vec{v}_{kn}^t} \quad (2-29)$$

式中， $\vec{v}^n$ 和 $\vec{v}^t$ 是两粒子在法向和切向上的相对速度， C 是刚度系数， ψ 是阻尼比系数定义如下：

$$C_n = 2E^*\sqrt{R^*|\vec{\delta}_{kn}^n|} \quad (2-30)$$

$$C_t = 8G^*\sqrt{R^*|\vec{\delta}_{kn}^n|} \quad (2-31)$$

$$\psi = \frac{\ln(e)}{\sqrt{\ln^2(e) + \pi^2}} \quad (2-32)$$



式中, e 是固体粒子的恢复系数。

总的法向接触力可表示为:

$$\bar{F}_{c,kn} = \bar{F}_{e,kn} + \bar{F}_{d,kn} \quad (2-33)$$

基于两粒子是否发生滑动计算总的切向接触力为:

$$\bar{F}_{c,kn}^t = \begin{cases} \bar{F}_{e,kn}^t + \bar{F}_{d,kn}^t & \left| \bar{F}_{c,kn}^t \right| > \mu_s \left| \bar{F}_{c,kn}^n \right| \\ -\mu_s \left| \bar{F}_{c,kn}^n \right| \frac{\bar{\delta}_{kn}^t}{\left| \bar{\delta}_{kn}^t \right|} & \left| \bar{F}_{c,kn}^t \right| > \mu_s \left| \bar{F}_{c,kn}^n \right| \end{cases} \quad (2-34)$$

式中, μ_s 为静摩擦力系数。

当颗粒接触发生滚动摩擦时, 产生力矩, 其法向和切向分量分别可以表示为:

$$\bar{T}_{kn}^t = \bar{F}_{c,kn}^t \times \bar{R}_k \quad (2-35)$$

$$\bar{T}_{kn}^r = -\mu_r R^* \left| \bar{F}_{kn}^n \right| \frac{\bar{\omega}_{kn}}{\left| \bar{\omega}_{kn} \right|} \quad (2-36)$$

式中, $\bar{\omega}$ 是相对角速度, μ_r 是滚动摩擦系数。

2.3 固-液相互作用模型

2.3.1 模型原理

MPS 方法和 DEM 方法的耦合通过力的传递来实现, 不同于固体颗粒间的作用力, 固体与流体之间力的作用由流速, 粘度等参数决定, 其包括阻力、压力梯度力、虚拟质量力和润滑力等。在本文工作中, 主要考虑了流体的拖曳力, 惯性力和润滑力三部分, 其余水动力被忽略。

固-液耦合作用原理如图 2-4 所示。首先通过液体流速确定流体粒子作用在固体粒子上的水动力, 将水动力叠加得到固体粒子所受的总力。利用牛顿第三定律, 作用在固体粒子上的流体力会反作用于流体, 计算得到 MPS 粒子所受力, 进而实现流固耦合过程的仿真计算。

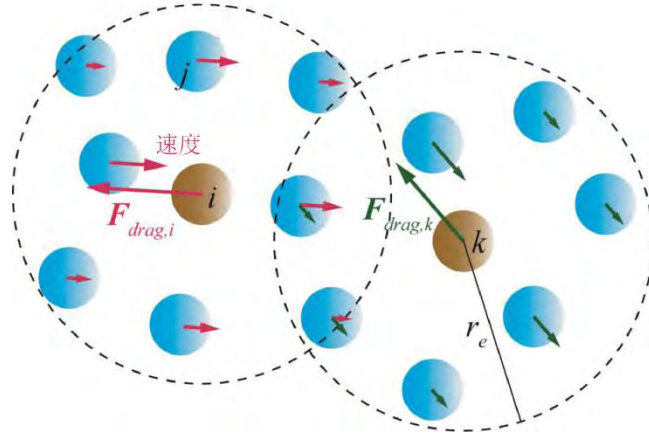


图2-4 流-固耦合作用

Fig. 2-4 Fluid structure coupling effect

2.3.2 水动力方程

(1) 拖曳力

作用在固体颗粒上的拖曳力取决于流体和固体粒子之间的局部体积分数和相对速度，由下式给出：

$$\vec{F}_k^d = \frac{\beta_k}{1 - \varepsilon_k} (\vec{u}_k - \vec{v}_k) V_k \quad (2-37)$$

式中， V_k 是粒子的体积， $\vec{u}$ 和 ε 分别是粒子的局部体积分数和流体速度， β_k 是两相间动量交换系数，以上参数的表达式分别为：

$$\varepsilon_k = \frac{\sum_i \varepsilon_i W_s(|\vec{r}_i - \vec{r}_k|)}{\sum_i W_s(|\vec{r}_i - \vec{r}_k|)} \quad (2-38)$$

$$\vec{u}_k = \frac{\sum_i \vec{u}_i W_s(|\vec{r}_i - \vec{r}_k|)}{\sum_i W_s(|\vec{r}_i - \vec{r}_k|)} \quad (2-39)$$

$$\beta_k = \begin{cases} 150 \frac{(1 - \varepsilon_k)^2}{\varepsilon_k} \frac{\mu_f}{d_k^2} + 1.75(1 - \varepsilon_k) \frac{\rho_f}{d_k} (|\vec{u}_i - \vec{v}_k|) & \varepsilon_k \leq 0.8 \\ 0.75 C_d \frac{\varepsilon_k (1 - \varepsilon_k)}{d_k} \rho_f \varepsilon_k^{-2.65} |\vec{u}_k - \vec{v}_k| & \varepsilon_k > 0.8 \end{cases} \quad (2-40)$$



式中, ε_i 是粒子局部体积分数, W_s 是附加权函数, d_k 表示粒子直径。 C_d 为阻力系数, 其表达式为:

$$C_d = \begin{cases} \frac{24}{\text{Re}_k} (1 + 0.15 \text{Re}_k^{0.687}) & \text{Re}_k \leq 1000 \\ 0.44 & \text{Re}_k > 1000 \end{cases} \quad (2-41)$$

粒子 k 的雷诺数定义为:

$$\text{Re}_k = \frac{\varepsilon_k \rho_f d_k |\vec{u}_k - \vec{v}_k|}{\mu_f} \quad (2-42)$$

(2) 润滑力

当两个固体粒子接近时, 其表面间隙不断减小, 介于两者之间的液体收到挤压, 形成流体的动压力, 也称之为润滑力, 表达式为:

$$\vec{F}_l = \frac{3\pi\mu_f d_s^2 (\vec{V}_{sj} - \vec{V}_{si})}{8(|\vec{r}_i - \vec{r}_k| - d_s)} \quad (2-43)$$

(3) 惯性力

本文采用惯性力表达式为:

$$\vec{F}_{vm} = 0.5\rho_f V_s \left(\frac{d\vec{V}_f}{dt} - \frac{d\vec{V}_s}{dt} \right) \quad (2-44)$$

以上介绍了流体作用在固体粒子上水动力的组成和求解方程。因此, 将拖曳力和压力梯度力进行组合, 就可以得到施加在固体颗粒上的总的流体力为:

$$\vec{F}_k^{\text{int}} = \frac{\vec{F}_k^d}{\varepsilon_k} - V_k \rho_f \vec{g} \quad (2-45)$$

固体反作用于流体的力需要满足动量守恒定律, 从以上公式可以推导出流体受到的作用力的表达式为:

$$\vec{f}_i^{\text{int}} = \frac{1}{V_i} \sum_k \left(\vec{F}_k^{\text{int}} \frac{W_s(|\vec{r}_i - \vec{r}_k|)}{\sum_j W_s(|\vec{r}_j - \vec{r}_k|)} \right) \quad (2-46)$$

式中, V_i 为 MPS 粒子的体积。



2.3.3 耦合方法计算流程

图 2-5 所示为 MPS-DEM 耦合方法在求解单相流和固-液两相流的计算流程，其中，针对两相流的计算主要分为以下几个步骤：

- (1) 搜索邻域粒子并建立粒子列表；
- (2) 对固相粒子的运动状态和受力进行计算，首先计算固-液相互作用力，其次计算固体粒子之间及固体粒子与管壁之间的接触力；
- (3) 更新固体粒子速度和坐标，检查时间上两种方法是否同步；
- (4) 计算 MPS 粒子粘性力和中间速度；
- (5) 计算 MPS 粒子密度，进行自由面检测；
- (6) 求解压力泊松方程，更新 MPS 粒子速度与坐标。

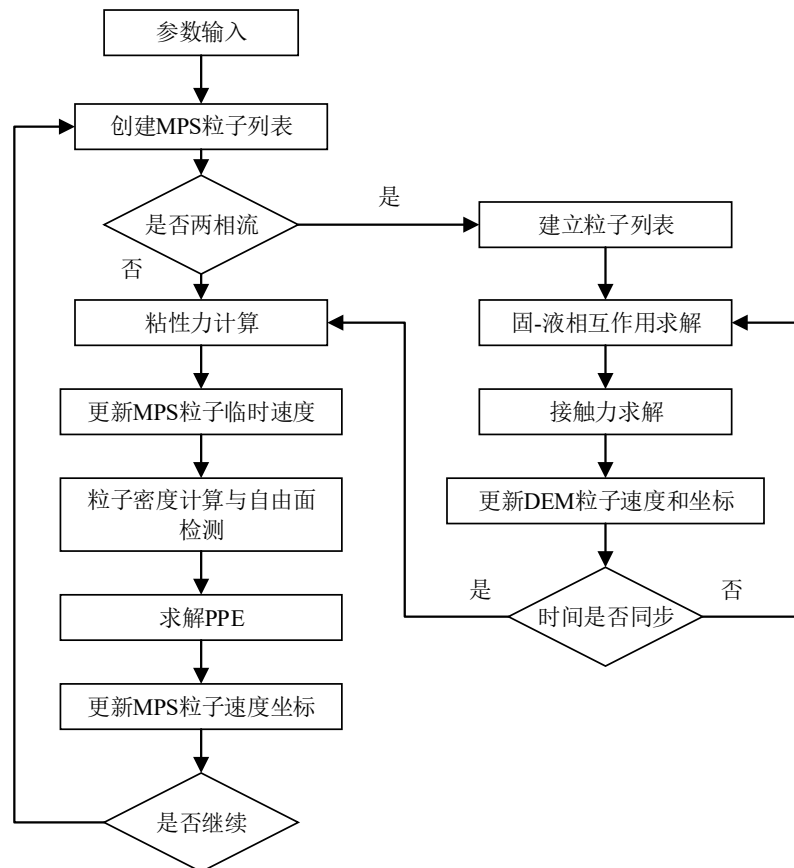


图2-5 耦合方法计算流程

Fig. 2-5 Coupling Method Calculation Process

本文使用 MPSDEM-SJTU 求解器，其架构如图 2-6 所示。

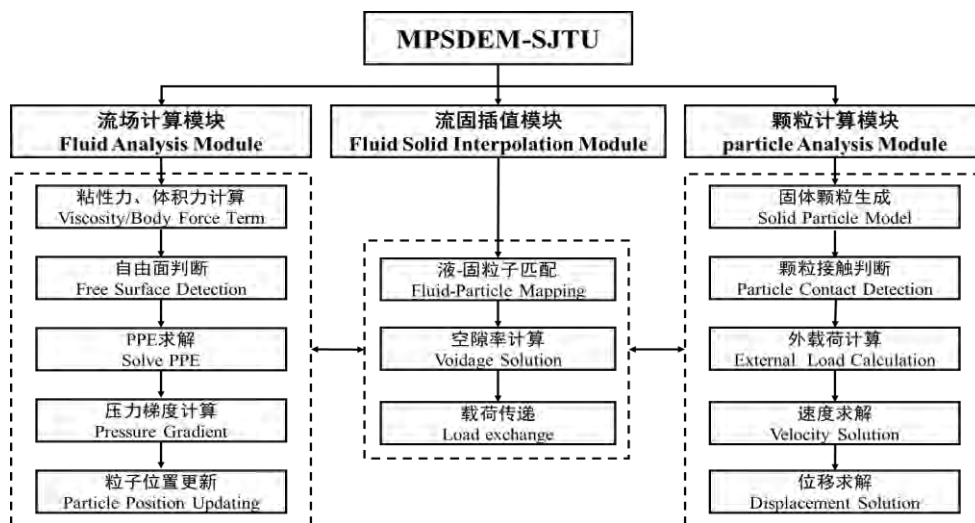


图2-6 求解器架构

Fig. 2-6 Solver Architecture

2.4 数值模拟设置

2.4.1 时间步长设置

由于 MPS 和 DEM 的方法不同，其时间步长也有区别，通常情况下 MPS 方法的时间步长要大于 DEM 方法。在本文中，DEM 方法的时间步长由公式（2-47）确定：

$$\Delta t_{\text{dem}} < \frac{\pi R \sqrt{\rho / G}}{0.0163v + 0.8766} \quad (2-47)$$

式中， R 表示固体粒子的半径， G 为粒子剪切弹性模量。

MPS 方法的时间步长应满足 CFL 条件：

$$\Delta t \leq 0.1 \frac{L_0}{V_{\max}} \quad (2-38)$$

式中， L_0 是初始粒子间距， $V_{\max}$ 是粒子中的最大速度。

同时，时间步长又要满足 Morris 条件：

$$\Delta t \leq 0.125 \frac{h^2 \rho}{\mu} \quad (2-49)$$

式中， h 为光滑长度。结合两种条件，得到时间步长的选择范围为：



$$\Delta t \leq \min \left(\Delta t \leq 0.1 \frac{L_0}{V_{\max}}, 0.125 \frac{h^2 \rho}{\mu} \right) \quad (2-50)$$

2.4.2 管壁边界条件

管道壁面的边界条件如图 2-7 所示，其由多种不同类型粒子构成。第一类边界粒子构成管壁，其中心的连线即为管壁的轮廓线。液体和固体粒子放置于管道内部，在求解流体的 PPE 时，同时也会求解第一类边界粒子的压力。为了保持管壁的稳定，使管道内部粒子不发生外溢，通常采用在管壁外布置多层粒子提供撑持的方法，也就是第二类边界粒子，如右侧图所示，在不同方向上同时存在多层粒子，保证了计算过程的稳定性。

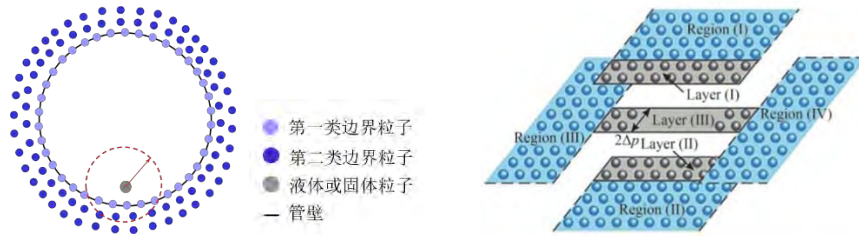


图2-7 管壁边界条件

Fig. 2-7 Boundary Conditions of Pipe Wall

2.4.3 出入口边界条件

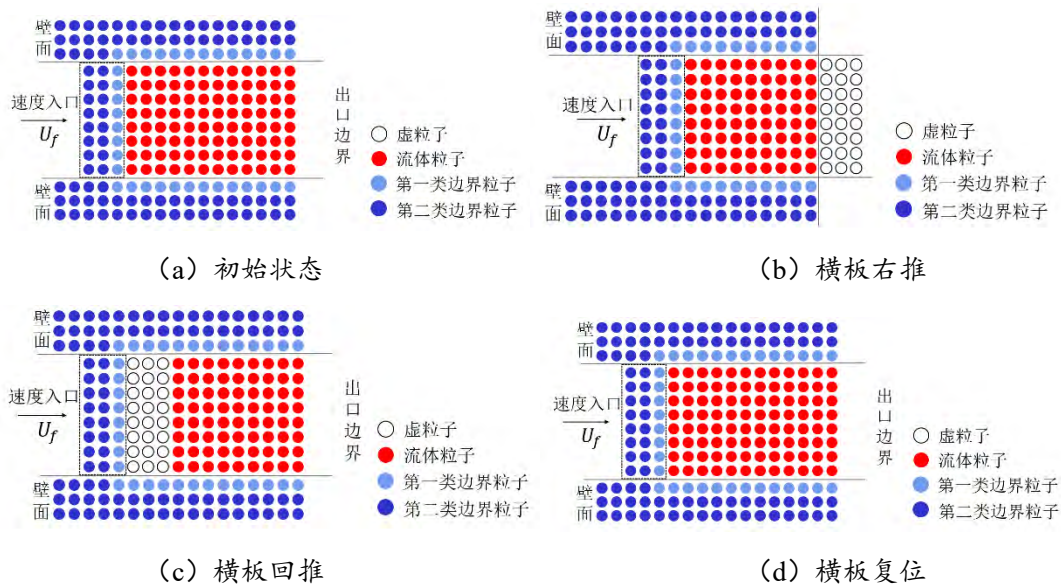


图2-8 出入口边界条件

Fig. 2-8 Boundary Conditions for Inlet and Outlet

图 2-8 为管道的出入口边界条件示意图。本文采用往复运动的横板来保证流场的持续流动，横板的运动速度决定流速的大小。在初始时刻，横板位于管道入口处，此时不发生流动；计算开始时横板向右移动；当移动到最右端时，横板复位，此时图 2-8 (c) 中白色粒子部分由虚粒子组成；在下一个循环开始前，虚粒子继承被排出管道粒子的信息，如速度，压力等，因此实现流场的持续流动。

2.4.4 模型参数设置

本文用于计算的管道模型如图 2-9 所示，可以更清晰看到不同粒子在管道中的组成情况。表 2-1 为固相和液相粒子的输入参数，其中固相时间步长取 0.001ms，液相时间步长取 0.01ms。

表2-1 粒子计算参数
Table 2-1 Particle parameters

固相		液相	
参数	数值	参数	数值
密度 / (kg/m ³)	2 700	密度 / (kg/m ³)	1 000
粒径 / m	0.015	运动黏度/(m ² /s)	1.0×10-6
杨氏模量/ (MPa)	100	初始粒子间距/m	0.01
泊松比	0.2	时间步长/ ms	0.1
恢复系数	0.9	—	—
摩擦系数	0.2	—	—
时间步长 / ms	0.001	—	—

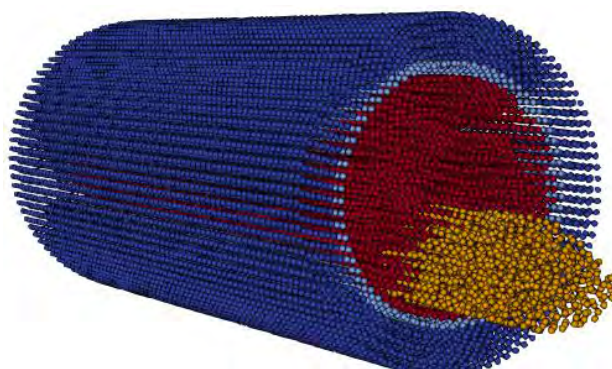


图2-9 物理模型
Fig. 2-9 Physical Model



2.5 本章小结

本章对固-液两相流的数值模拟方法及计算参数进行了介绍。在液相模拟中，介绍了基于拉格朗日思想的 N-S 方程，液体粒子间的相互作用模型以及自由面检测等提高计算精度的方法。在固相模拟中，介绍了固体粒子的运动方程和碰撞模型。此外，也介绍了 MPS-DEM 耦合方法的计算流程和 MPSDEM-SJTU 求解器架构。最后，为进一步提高计算模拟时的准确性，介绍了时间步长的选取原则，以及管壁边界条件，进出口边界条件和粒子参数等数值模拟设置。



第三章 振荡影响下垂直管道数值模拟

3.1 数值验证

MPSDEM-SJTU 求解器既可以模拟液体流动,也可以求解固-液混输问题。本文就泊肃叶流和实验对比两个方面对求解器的准确性进行了对比分析。

泊肃叶流指粘性流体在圆形管道中的流动行为,由于边界层影响,液体速度从管壁至管道中心呈现逐渐升高的趋势。采用图 3-1 中的计算模型, $D=0.2\text{m}$, 管道中只放置液体粒子。图 3-2 为流场充分发展后,液体粒子在管道纵向截面上的速度分布情况,可以看到,其分布符合泊肃叶流抛物线的特征。

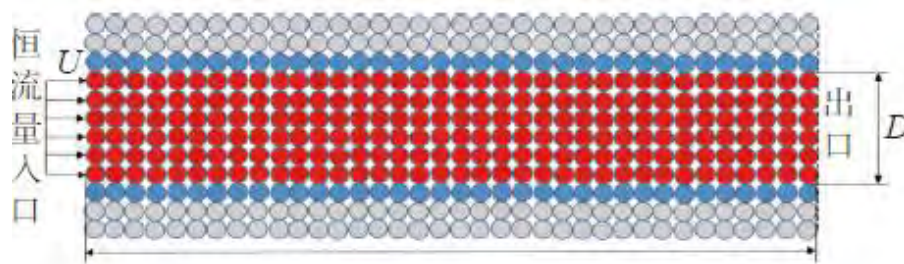


图3-1 泊肃叶流计算模型

Fig. 3-1 Calculation model for Poisson's flow

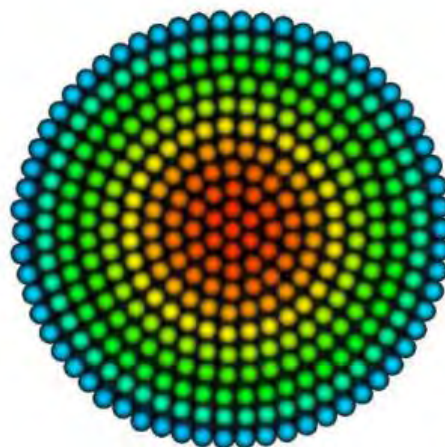


图3-2 液体粒子速度

Fig. 3-2 Liquid particle velocity



在定性分析基础上,进行了数值模拟结果与理论解析解的对比分析,泊肃叶流条件简单,其基本方程组具有解析解,如公式(3-1)所示。如图3-3所示,圆点为液体速度的解析解,红色三角形为本文所使用求解器的数值模拟结果。可以看到,在单流体模拟中有着较好的精度。

$$u = \frac{6Q}{D^3}(y^2 - Dy) \quad (3-1)$$

式中, Q 为流量, y 为距管道底部距离, D 为管道直径。

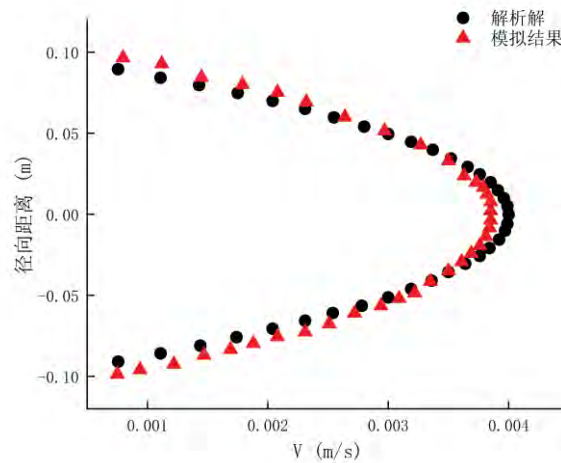


图3-3 数值方法与解析解对比

Fig. 3-3 Comparison between numerical methods and analytical solutions

本文借鉴了 Alajbegovic^[100]所进行的立管固-液两相流实验结果。配置了相同计算参数的算例,并以固体颗粒在管道径向速度分布为对象进行结果的对比。计算参数如表3-1所示。

表3-1 实验参数
Table 3-1 Particle parameters

参数	单位	数值
管道长度	m	2.5
管道直径	m	0.1
输运速度	m/s	1
粒子密度	kg/m ³	1400
粒子半径	mm	1.5
实验浓度	%	5

图 3-4 为固体粒子速度分布对比，可以看到，固体粒子速度均随着径向距离与管道直径比的增加降低，在径向距离比为 0.8 之前有较好的吻合度。数值模拟在末端缺少，这说明在径向距离比为 0.8 之后，数值模拟中不再有固体粒子分布，此误差可能是由于粒子形状的不同导致。

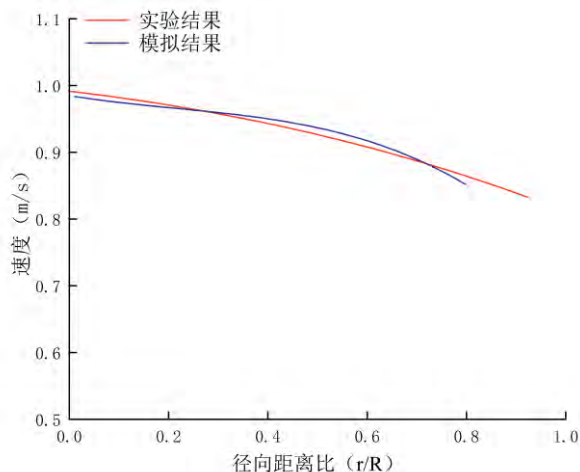


图3-4 固体粒子速度分布对比

Fig. 3-4 Comparison of velocity distribution of solid particles

3.2 管道振动形式

本文中，主要考虑横流对管道位移的影响，将立管简化为简支梁，由于立管长度可达到几千米，且多为柔性材料，因此沿管道长度振动位移不同，可用下式进行表示 [92]：

$$w(x) = A \cos\left(\frac{n\pi x}{L}\right) \sin(\omega t) \quad (3-2)$$

式中， A 为振幅， w 为频率， n 为振动模态。

考虑本文中使用长度为 4m 的立管为研究对象，可近似视为沿管道长度振动位移分布相同，研究发现，低阶模态在立管的振动响应中所占的比例较大，取一阶振动模态下的运动进行计算分析，为了研究的减少复杂性，可将振荡运动简化为如下形式：

$$w(x) = A \sin(a\omega t) \quad (3-3)$$



3.3 静止与振动立管对比分析

静止立管的水力输运过程会随着时间充分发展后趋于稳定,其粒子流态和流场特征主要与输运速度及粒子本身参数有关。当管道发生振动位移时,很容易知道内部流场,特别是固体粒子的运动方式会发生明显改变,为探究振荡运动对流场状态的影响和机理,有必要对静止和振动立管进行对比分析,本节设置两个算例工况,如表 3-2 所示,其中管道长度为 4m,半径 0.1m。输运速度为 1m/s,固体粒子浓度为 10%。

表3-2 计算参数

Table 3-2 Parameters

工况	振幅	周期
1	0m	0s
2	0.1m	1s

图 3-5 为管道只放置一个固体粒子时,对粒子在不同流场时刻的轨迹追踪图。振动方向为横向振动。在静止管道中,固体颗粒虽然也存在左右运动,但位移很小。在流场发展初始阶段,两粒子运动轨迹相似,但随着流场发展,振动管道中的颗粒发生较大的横向位移,且有周期性运动趋势,这表明振动导致固体颗粒在管道中的运动发生变化,变得更加剧烈和无序。

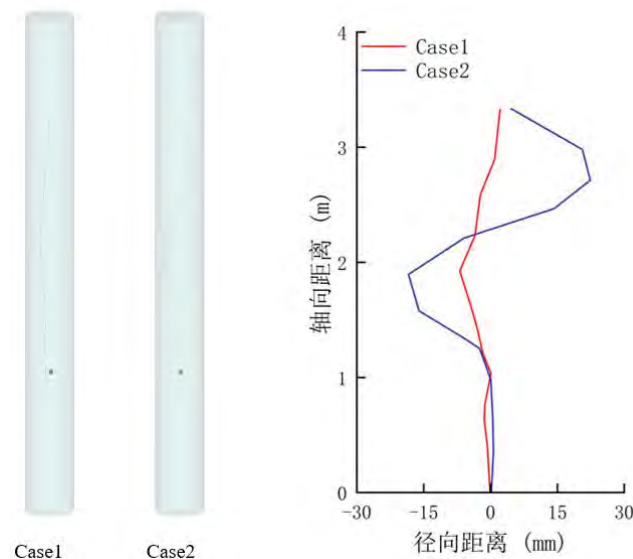


图3-5 单粒子运动轨迹

Fig. 3-5 Single particle motion trajectory

图 3-6 为从 0 时刻开始一段时间内的流场发展情况，展现了流场充分发展前所需时间及流场内固体粒子的运动状态。可以看到，静止管道中的固体粒子总体上保持了输运的连续性，且粒子都集中在管道中心附近，很少发生固体粒子与管壁碰撞情况。对于振动管道，从 $t=0.4s$ 开始，粒子输运的连续性被打断，固体粒子聚团，并开始与管壁发生碰撞。

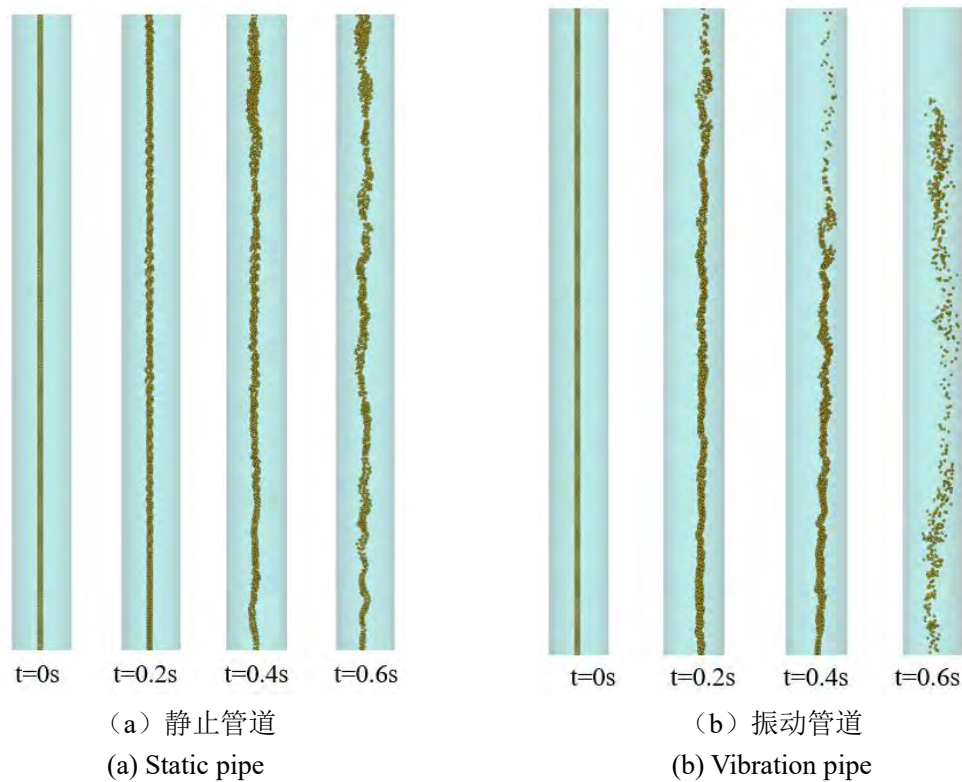


图3-6 初始时刻流场发展情况

Fig. 3-6 Single particle motion trajectory

为进一步了解流场充分发展后的不同工况下的粒子运动情况，对静止管道与振动管道同一周期内不同时刻的粒子流态进行了对比分析，如图 3-7 所示。静止管道中，粒子接近于均匀悬浮流，有小规模堆积但输运集中在管道中心附近。从图 3-7 (b) 中可以看到，固体粒子运动方式受振动影响非常大，在同一周期的不同时刻呈现不同的流动状态。除粒子间的碰撞外，粒子与管壁也发生碰撞接触，这些碰撞改变了其运动方向，粒子发生明显的堆积，特别是在管道出口和管壁附近。此外，还可以看到，粒子整体流态随时间发生波动变化，与静止管道不同的是，输运过程中粒子偏离管道中心，多数聚集在管壁处。

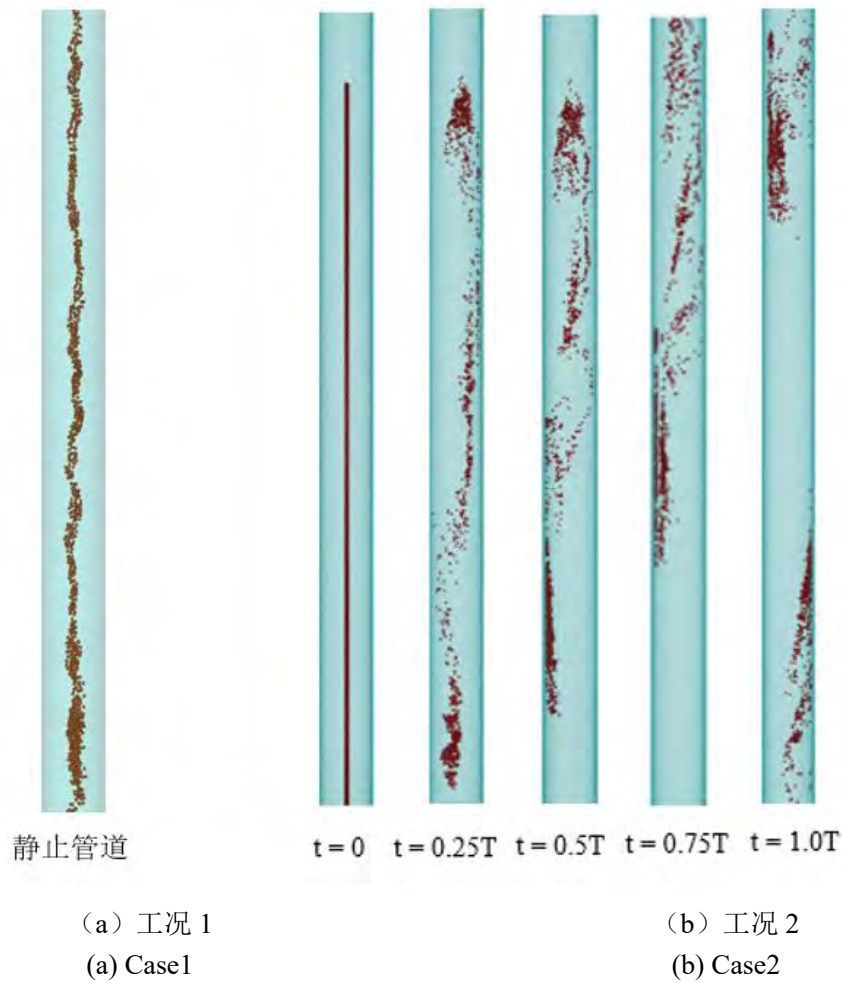


图3-7 不同工况粒子流态对比图

Fig. 3-7 Comparison of particle flow states under different operating conditions

在上述分析基础上,对粒子在管道内分布进行量化分析,在两组工况中,取 $t=0.25T$ 时相同位置截面分析管道径向距离上固体粒子体积分数分布,图 3-8 展示了在纵向截面上粒子的分布情况,图 3-9 描述了沿径向距离固体粒子的体积分数变化规律。静止时,粒子多聚集在管道中间部分,管道壁面附近没有粒子,且分布较为均匀,最大体积分数在 $Z=105\text{mm}$ 处,为 21.6%。管道振动时在壁面附近有明显的聚团现象,管道横向位移导致粒子分布的不均匀,在 $Z=0\text{mm}$ 附近的壁面,粒子较少,在管道的上半部分,粒子较多,沿径向距离的体积分数变化剧烈,在 $Z=150\text{mm}$ 处,体积分数为 27%,明显大于静止管道,很明显振动会造成粒子的堆积,这种现象也将加剧粒子间的相互作用碰撞。

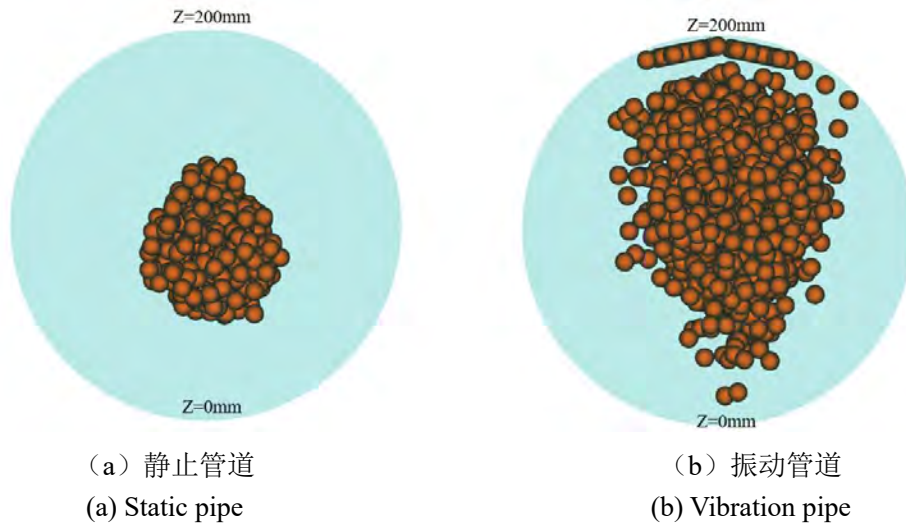


图3-8 管道截面粒子分布图

Fig. 3-8 Particle distribution in the cross-section of the pipeline

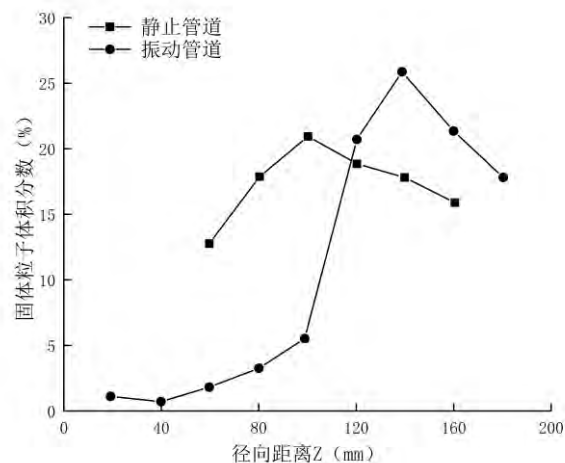


图3-9 径向距离粒子体积分分数图

Fig. 3-9 Particle volume fraction on radial distance

以 1m 长管道内流场为分析对象，分析静止管道与振动管道压力损失对比，如图 3-10 所示。通过监测典型时刻的压力损失，对数据采用三次样条插值进行拟合处理，进而得到一个周期内的压力损失变化规律，本文之后的压力损失变化均采取这种数据处理方式。可以看到，随着管道周期性的振动，流场的压力损失情况也发生周期性变化，周期约为 $0.9T$ ， T 为管道振动周期，即压力损失变化周期接近管道周期，压力损



失峰值为 21%。此外,对于平均压力损失,静止管道为 9.91%,振动管道为 11.65%,振动管道比静止管道低 11.5%,这说明振动造成了管内流场的能量损失,理论上这源于固体粒子横向位移和碰撞的加剧。

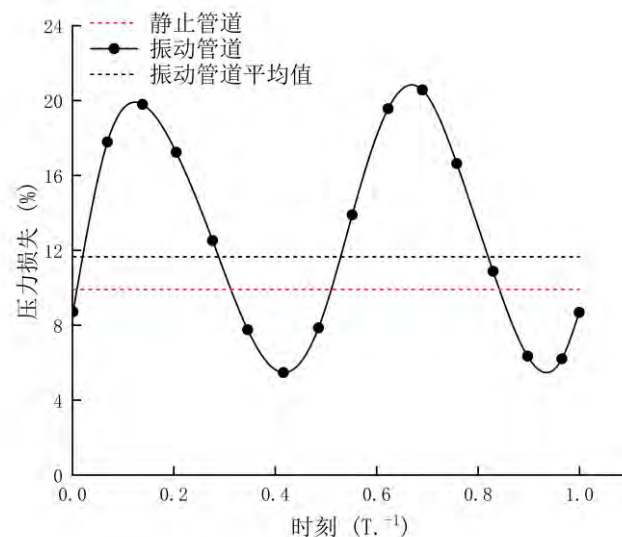


图3-10 压力损失变化图

Fig. 3-10 Pressure loss variation chart

除了观察粒子和流场的整体情况,图 3-11 给出了静止管道和振动管道固体粒子的速度分布云图,输运速度为 1m/s,选取相同位置的管道径向截面进行分析。可以看到,在两组工况中,固体粒子速度要小于输运速度。在静止管道中,固体粒子最大速度在管道中心附近,且分布较均匀,越靠近壁面,固体粒子的速度越低,这是由于液体速度在管道径向分布特征导致,固体粒子速度很大程度上决定于其周围的流体速度。在振动管道中,固体粒子速度出现了较大的散布,由径向距离 $Z=0\text{mm}$ 至 $Z=200\text{mm}$ 过程中速度逐渐衰弱,最大速度发生在管壁附近而不是管道中心。此外还能看出振动管道的最大速度区域大小要小于静止管道,这是因为管道发生振动时,固体粒子速度变为由两部分提供,一方面是受流体作用的轴向速度,另一方面是受管道横向位移影响而产生的径向速度,其共同作用导致了最大速度和分布的不同。

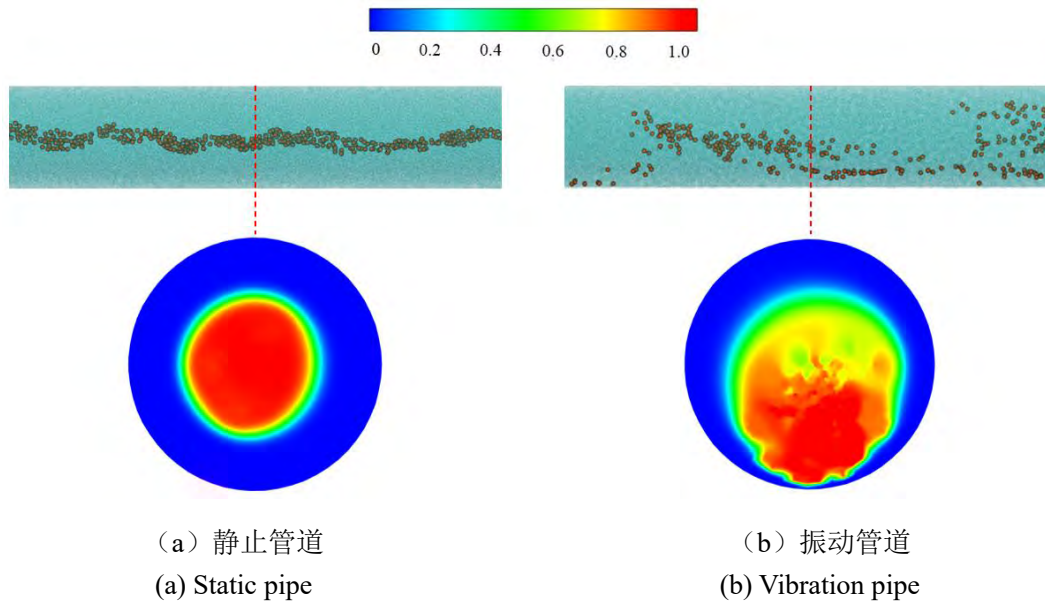


图3-11 固相在管道截面速度分布图

Fig. 3-11 Velocity distribution of solid phase in pipeline cross-section

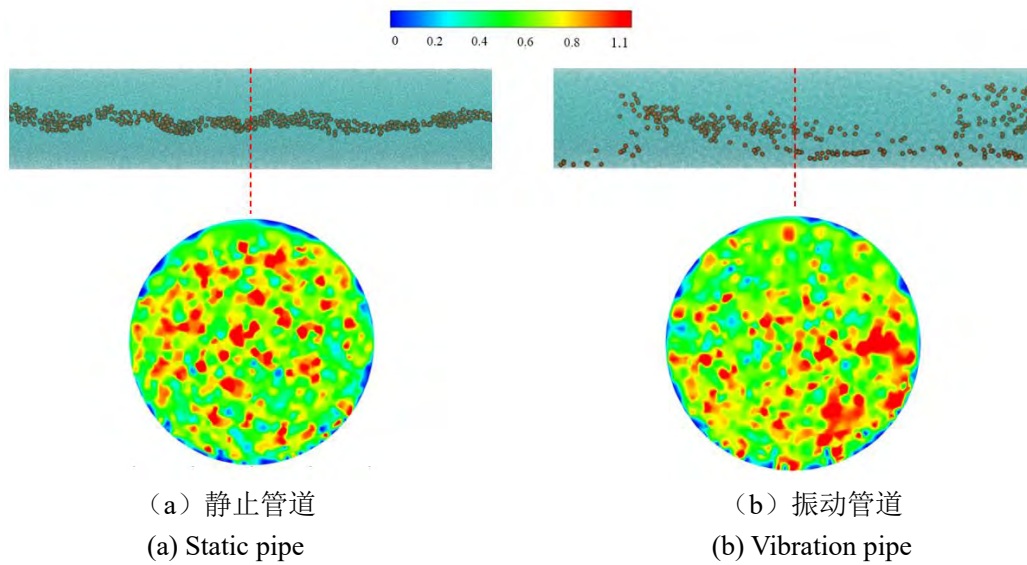


图3-12 液相在管道截面速度分布图

Fig. 3-12 Velocity distribution of liquid phase in pipeline cross-section

图 3-12 为静止管道与振动管道液相速度云图。可以看到，静止管道中液体速度分布均匀，且最大速度多位于管道中心周围。振动管道中，在管壁附近也出现了较大的速度分布，截面内速度分布变化无序剧烈。这说明振动不但影响固体的速度分布，也



在一定程度上造成了管道内部流体速度分布与静止管道的不同，而流体速度分布会进一步影响固体的速度变化。

对管道截面进行了二维数据分析可以快速了解流场的典型特征，但想获得更加详细的结果，需要对总体管道进行分析。图 3-13 是两组工况中，管道所有固体粒子从管道下壁面到上壁面的速度变化情况， $Z=0\text{mm}$ 时为管道中心。可以看到，不同固体粒子组成了整体速度的脉动变化，其中静止管道中固体粒子速度沿管道中心近似对称分布，速度峰值在管道中心附近，其速度分布范围和速度大小变化符合上文中径向截面的分析结果。振动管道中，不同位置的固体粒子速度发生较大的跃迁，总体呈现大幅度的波动变化，这会导致更多的动量损失，同时，速度峰值出现在两侧的近壁面位置，管道中心附近为速度的峰谷，这与静止管道完全相反。需要注意的是，两工况中固体粒子速度的数值和分布范围不同，一方面，振动管道中固体粒子速度分布更广，几乎涵盖了整个管道，而静止管道中固体粒子的速度分布更趋向于聚集在管道中心。另一方面，静止管道中，粒子速度最大值为 0.98m/s ，速度平均值为 0.96m/s 。振动管道中，粒子速度最大值为 0.95m/s ，速度平均值为 0.85m/s 。这说明振动使固体粒子损失更多的能量，速度降低，这也较好解释了粒子流态分析中为什么振动管道内粒子堆积现象要更加严重。

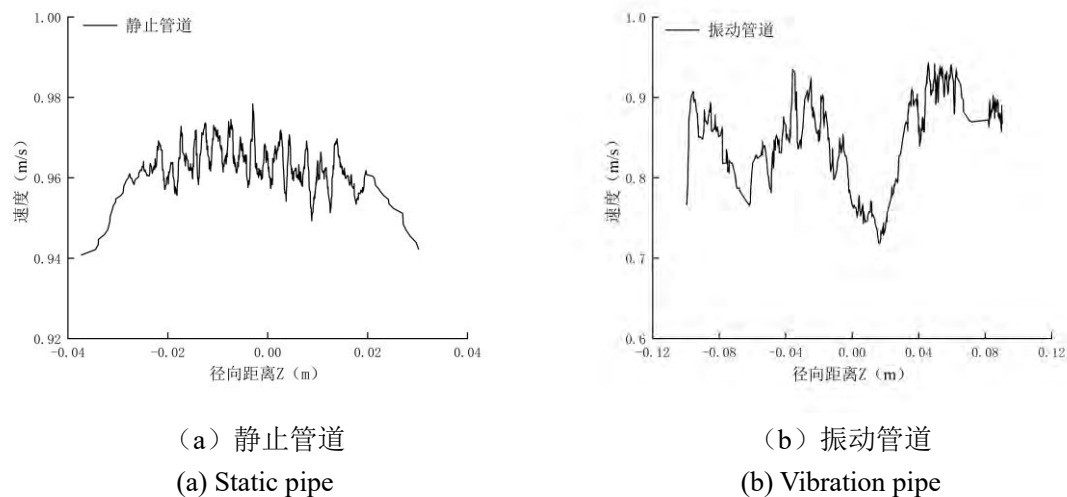


图3-13 管道内固体粒子速度分布图

Fig. 3-13 Velocity distribution of solid phase in pipeline

上文提到, 振动使粒子在输运过程中发生波动变化, 明显这也会造成固体粒子速度上的改变。图 3-14 给出了同一周期内不同时刻在相同径向截面上的固体粒子速度分布情况。管道的横向位移导致了速度分布的变化, 在不同时刻, 振动改变了固体粒子速度的分布和最大速度位置, 相同的是, 最大速度仍都发生在管壁处, 这说明管道内固体速度也随振动发生周期性波动。

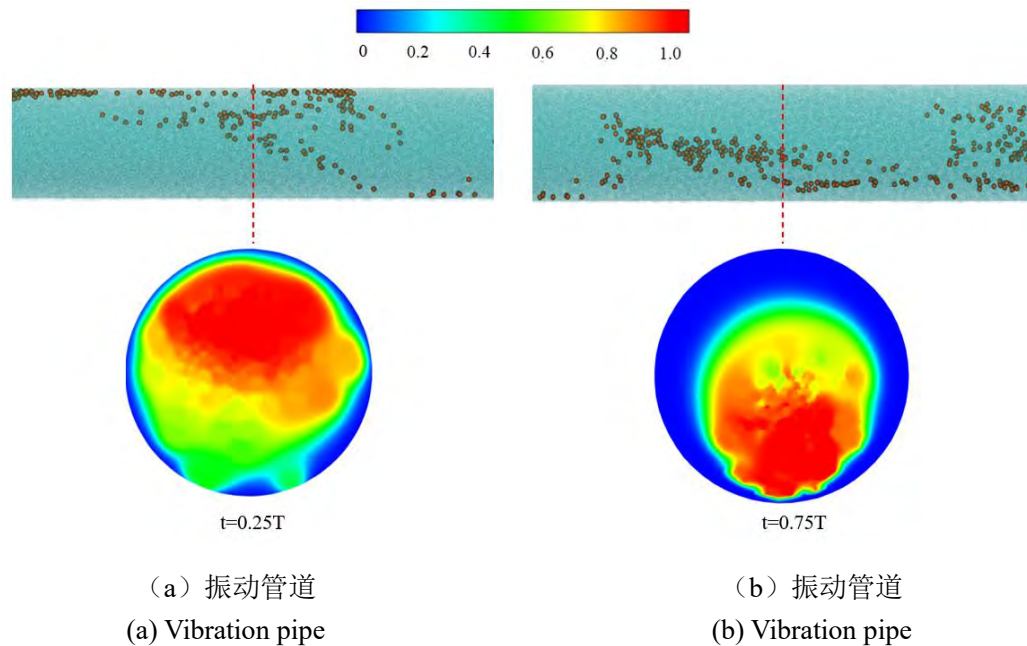
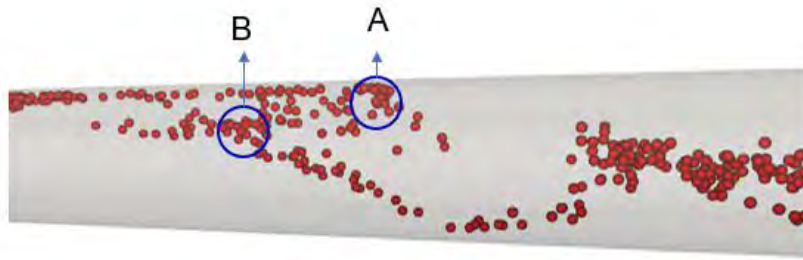


图3-14 管道内固体粒子速度分布图

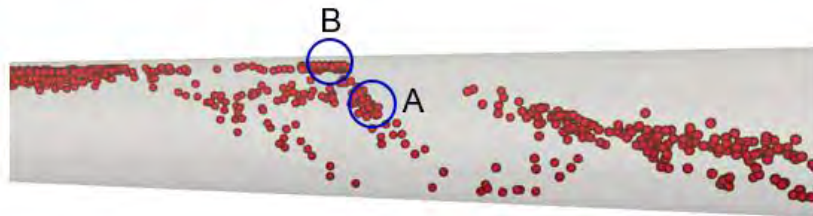
Fig. 3-14 Velocity distribution of solid phase in pipeline

为探究导致固体粒子速度分布变化的原因, 对振动管道输运过程中的粒子运动进行追踪监测, 如图 3-15 所示。为方便观察和标记, 取两个位移路径近似的粒子团进行分析, 如图 3-15 (a) 中的 A 和 B 两个圆形区域。初始时刻, 粒子团 A 与管壁发生碰撞, 粒子团 B 位于管道中上部, 两者存在一定距离。随着输运的进行, 粒子团 A 与管壁碰撞后改变了运动方向, 逐渐向管道中心移动, 此时粒子团 B 即将与管壁发生碰撞, 两者间的距离缩小, 如图 3-15 (b) 所示, 粒子团 B 追上了粒子团 A, 这说明前者的速度大于后者。随着粒子团 B 中粒子与管壁发生碰撞, 粒子团 A 移动到管道中下部分, 且位置已经落后于粒子团 B, 粒子团 A 的速度进一步降低, 这说明粒子团 A 与管壁碰撞导致两个结果: 先是粒子的动能损失, 其次是碰撞将粒子的轴向速度部分转变为径向速度, 影响了正常的输运过程。所以, 在碰撞发生前为粒子轴向速度最大时刻, 也因此粒子的最大速度发生在管壁附近。



(a) 初始位置

(a) Initial position



(b) 管壁碰撞

(b) Collision with Wall



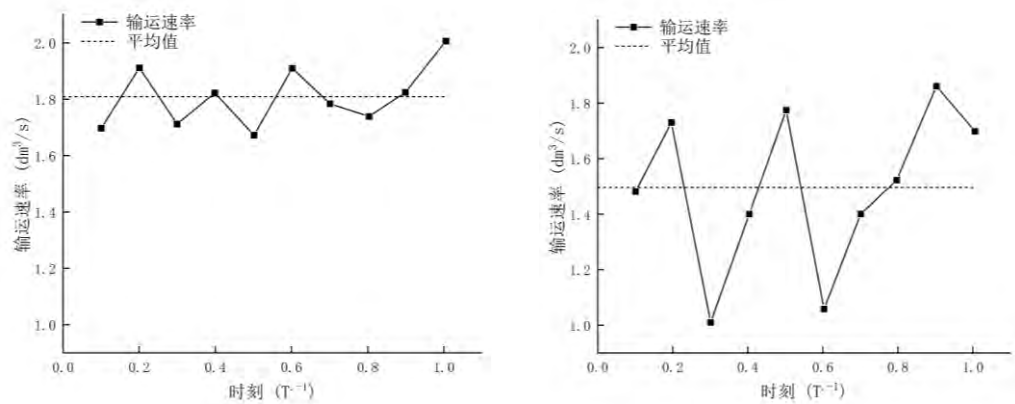
(c) 碰撞后粒子位移

(c) Particle displacement after collision

图3-15 管道内固体粒子微团运动图

Fig. 3-15 Solid particles movement in pipeline

取 $x=2.4\text{m}$ 处径向截面监测不同工况下固体粒子的运输速率变化,如图 3-16 所示。运输过程中,粒子的运输速率随时间发生波动。可以看到,静止管道中波动幅值要小于振动管道,但波动频率大于振动管道。此外,振动管道固体粒子运输速率的平均值为 $1.5\text{dm}^3/\text{s}$,静止管道为 $1.8\text{dm}^3/\text{s}$,前者比后者低 20%,这表示振动会降低固体粒子的运输速率。



(a) 静止管道

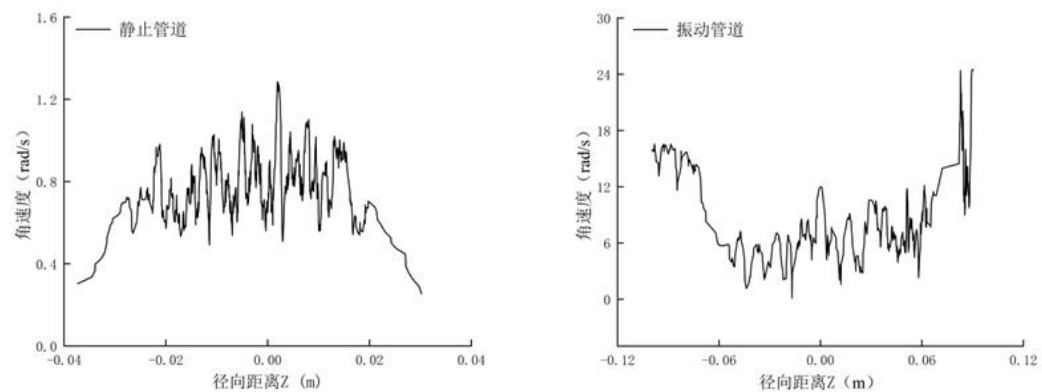
(b) 振动管道

(a) Static pipe

(b) Vibration pipe

图3-16 固体粒子输运速率变化图

Fig. 3-16 Solid particle transport rate



(a) 静止管道

(b) 振动管道

(a) Static pipe

(b) Vibration pipe

图3-17 固体粒子角速度变化图

Fig. 3-17 Angular velocity of solid particles

图 3-17 为管道中所有固体粒子的角速度沿径向方向变化情况。静止管道中角速度先升高后降低并在管道中心附近具有最大值。振动管道中粒子角速度先降低后升高，在管道中心附近具有最低值。在量级方面，静止管道中粒子最大角速度为 2.16 rad/s ，振动管道为 33.32 rad/s ，远大于静止管道，最大角速度在管壁附近。这说明静止管道

中角速度主要源于固体粒子间的碰撞接触，而振动管道中粒子的角速度主要由粒子与管壁的碰撞产生。同样，大的角速度会消耗流场能量，这也进一步解释了振动管道中固体粒子速度要较小的原因。

3. 4 不同振幅对立管流场影响

管道振动运动复杂，会出现不同的振动形态。本节针对不同振幅设置两组对比工况进行分析研究，如表 3-3 所示，振动方向为横向，管道半径为 0.1m，周期均取 1s。输运速度为 1m/s，固体粒子浓度为 7%。

表3-3 不同振幅实验参数

Table 3-3 Particle parameters

工况	振幅/半径（A/R）	周期
1	1	1s
2	0.5	1s

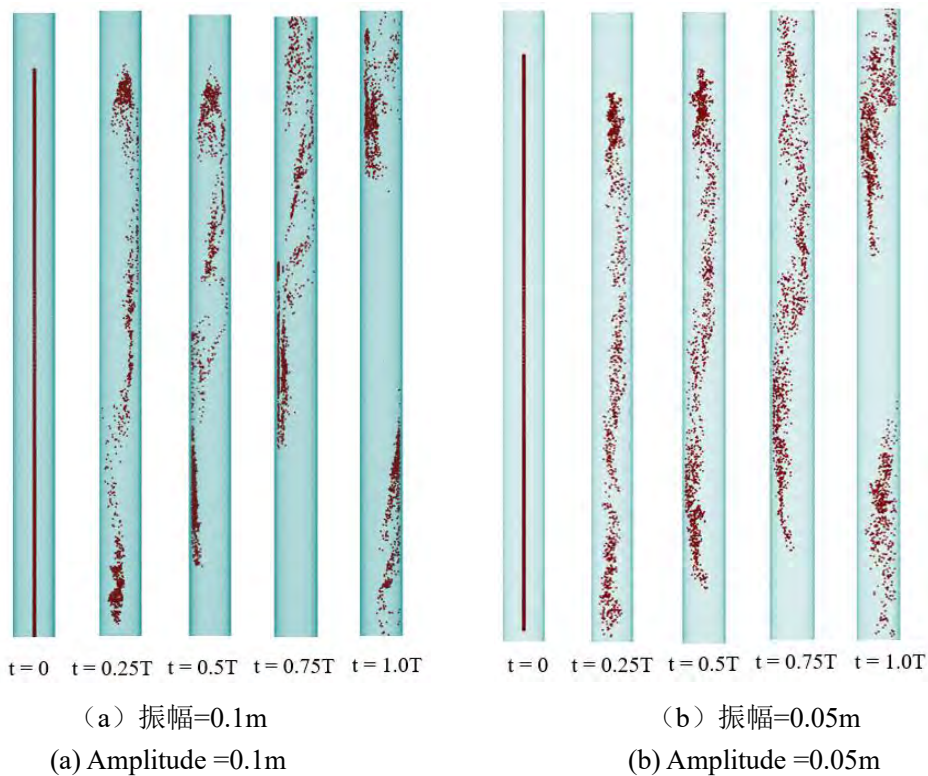


图3-18 不同振幅粒子流态图

Fig. 3-18 Particle flow patterns with different amplitudes



图 3-18 为不同振幅工况，同一周期下不同时刻的粒子流态情况。由于管道存在振动，两组工况下固体粒子流态均呈现波动状态。当振幅为 0.1m 时，粒子输运不连续，固体粒子在管壁和管道中心处的体积分数增加，伴随局部粒子聚集现象。当振幅为 0.05m 时，可以看到固体粒子与管壁的碰撞接触区域减小，虽然也存在粒子聚集现象，但相比更少，输运过程更加连续。总体来说，振幅的减小，有利于保持固体粒子输运的稳定性，这可能是因为更小的管道横向位移会避免部分碰撞的发生。

取相同径向截面分析固体粒子沿管道径向的体积分数分布情况，如图 3-19 所示， $Z=0\text{mm}$ 为管道中心，折线图左侧为该径向截面内固体粒子的流态情况。可以看到，随着振幅增加，粒子分布的不均匀性也会增加。振幅为 0.1m 时，此截面内固体粒子多数聚集在管道上半部分，约为 80%。振幅为 0.05m，即管道半径的一半时，固体粒子体积分数分布更均匀，粒子聚集规模更小，此时体积分数峰值为 20.6%，而工况 1 中体积分数峰值为 25.9%，局部粒子体积分数高，在高浓度工况下有可能出现管道堵塞的风险。

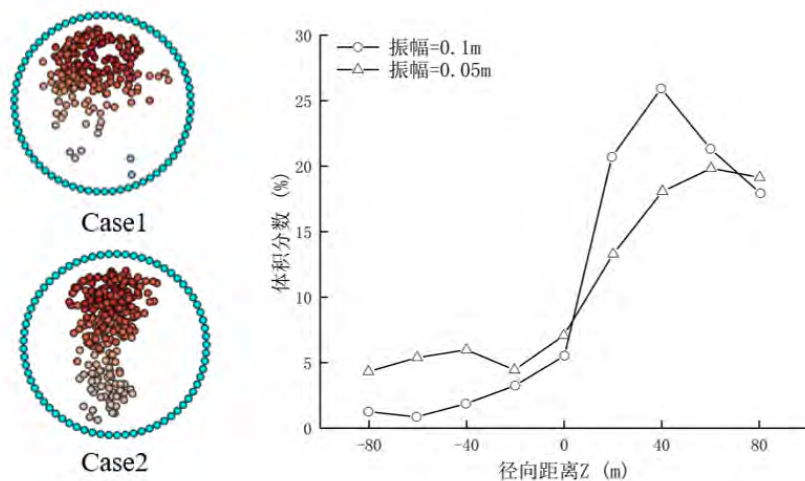


图3-19 不同振幅固体粒子体积分数图

Fig. 3-19 Volume fraction of solid particles with different amplitudes

图 3-20 为同一时刻，相同径向截面上固相速度分布云图。两个工况中，最大速度都出现在管壁附近，但振幅为 0.05m 时最大速度分布向管道中心扩散，这代表着小振幅情况下最大速度位置不仅在管壁附近，也可能发生在管道中心位置。这是因为一部分没有与管壁发生碰撞的粒子仍保留着较高的轴向速度，另一方面这也说明振幅主要影响固体粒子较大速度的发生位置。

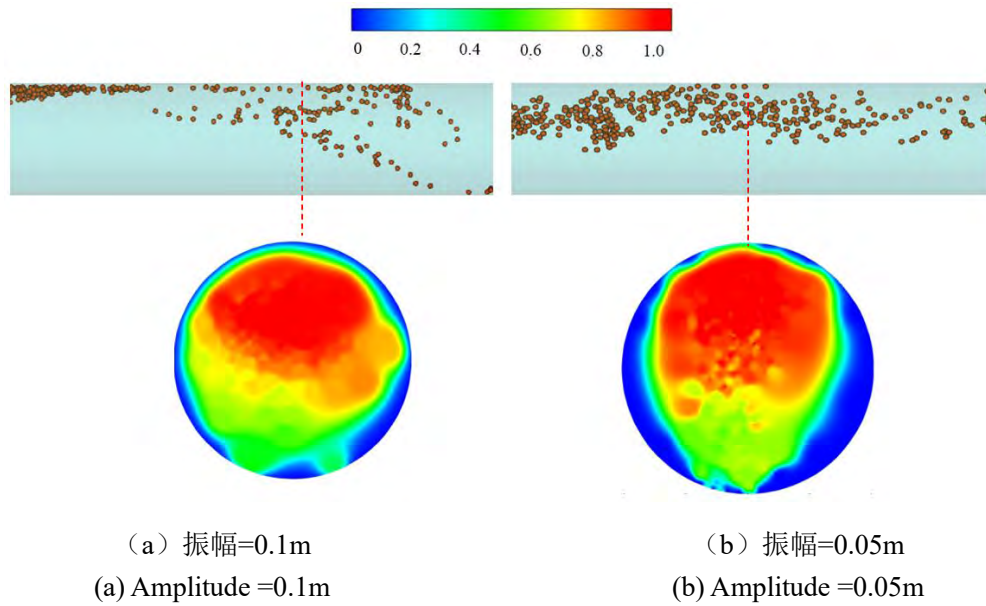


图3-20 不同振幅固相速度云图

Fig. 3-20 Solid phase velocity cloud map with different amplitudes

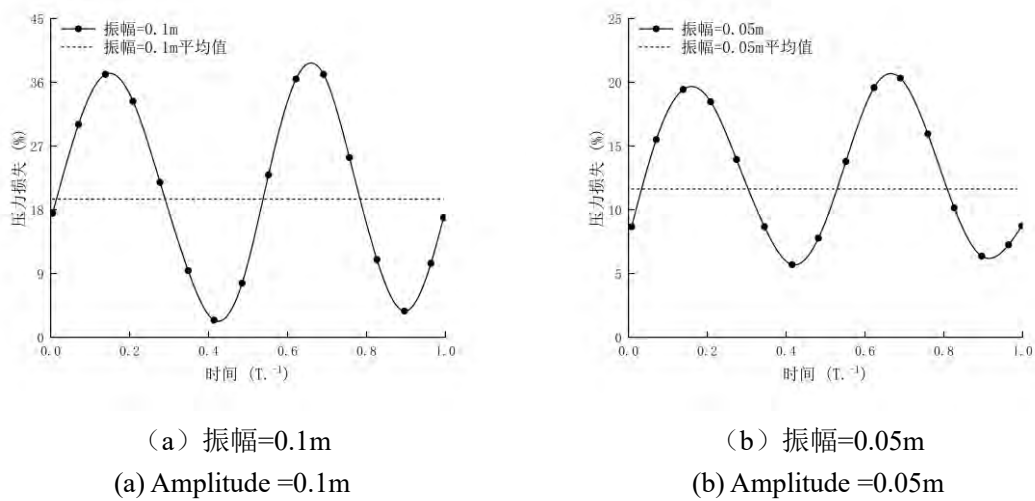


图3-21 不同振幅压力损失变化图

Fig. 3-21 Pressure loss with different amplitudes

同样取 1m 管长为对象分析不同振幅下流场压力损失情况，如图 3-21 所示。由于周期相同，其压力损失周期性变化形态大致相同。振幅为 0.1m 时，压力损失峰值为 33.3%，平均值为 19.5%。振幅为 0.05 时，压力损失峰值为 20.3%，平均值为 11.6%，



分别较前者低 39%和 40.5%。所以,振幅越小,流场的压力损失越低,能量损耗越少,在一定程度内控制管道振幅可实现节能提效。

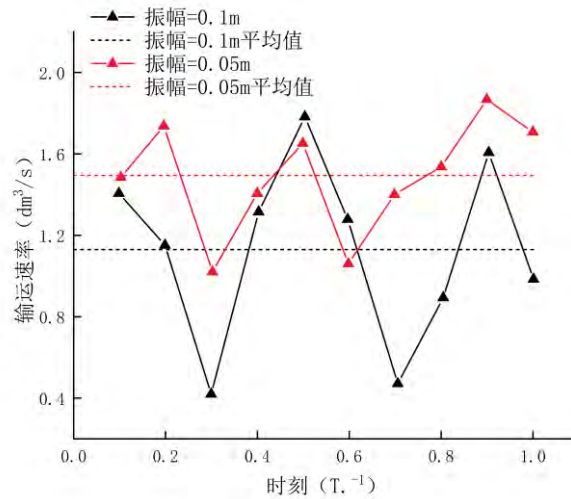
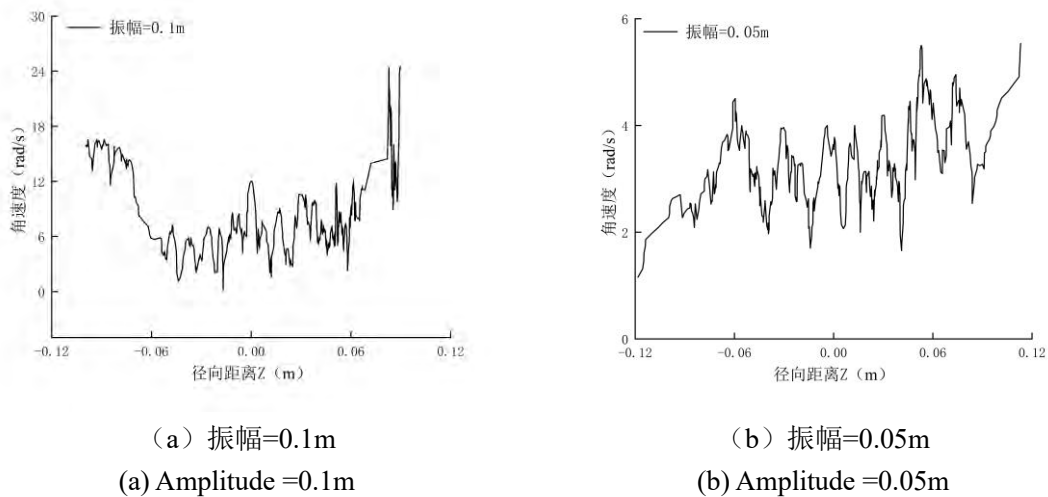


图3-22 不同振幅固体粒子输运速率变化图

Fig. 3-22 Solid particle transport rates with different amplitudes



(a) 振幅=0.1m

(a) Amplitude =0.1m

(b) 振幅=0.05m

(b) Amplitude =0.05m

图3-23 不同振幅角速度变化图

Fig. 3-23 Angle velocity with different amplitudes

图 3-22 为在同一周期不同时刻粒子输运速率变化情况。振动幅值为 0.05m 时固体粒子输运速率随时间波动变化较小,粒子流动更加稳定,峰值为 $1.91\text{dm}^3/\text{s}$ 。平均输



运速率为 $1.5 \text{ dm}^3/\text{s}$ 。振幅为 0.1m 时，粒子输运速率有较大浮动，这是由于粒子的聚集导致输运不稳定，最低值为 $0.47 \text{ dm}^3/\text{s}$ ，平均值为 $1.12 \text{ dm}^3/\text{s}$ ，小于小振幅工况。

图 3-23 为相同时刻管道中固体粒子的角速度分布，径向坐标 $=0.06$ 时为管道中心。从前文中可知，振幅为 0.1m 时，粒子最大角速度出现在壁面附近，且主要由固体粒子与管壁碰撞导致。在振幅为 0.05m 工况中，可以看到固体粒子的角速度也呈现靠近管壁高，管道中间低的趋势，但并不明显。这同样说明当振幅为 0.05m 时，固体粒子也会与管壁发生碰撞，但剧烈程度要低于 0.1m 振幅工况。

3.5 不同周期对立管流场影响

管道的不同振动形态不仅体现在振幅不同，往往还存在振动周期的差异，为进一步了解不同振动形态导致的流场特征变化规律，本节针对不同振动周期设置两组对比工况进行分析研究，如表 3-4 所示，同样地，管道半径为 0.1m ，输运速度和固体粒子浓度设置与 3.4 节中相同。振动方向为横向，振幅与管道半径比均取 1，即振幅为 0.1m 。

表3-4 不同周期实验参数
Table 3-4 Particle parameters

工况	振幅/半径 (A/R)	周期
1	1	1s
2	1	0.5s

图 3-24 给出了不同周期下固体粒子流态随时间变化情况。可以看到，周期为 0.5s 工况下，固体粒子虽然也存在聚集现象，但与周期 1s 工况不同的是，粒子团聚集特点为规模小，数量多，更多粒子分布在管道中间进行输运，因此，小周期振动具有较好的输运连续性。此外，从固体粒子流动状态来看，周期为 0.5s 工况的粒子流波动性要比周期为 1s 工况更强，粒子与管壁接触面积更小，立管的振动周期主要可以影响管道内部固体粒子的流动状态。

图 3-25 为某一时刻，相同径向截面中固体粒子沿管道径向的体积分数分布图。周期为 0.5s 时，粒子体积分数分布更加均匀，最大为 18.2% ，最小为 6.3% ，相差 11.9% 。相较而言，周期为 1s 工况最大值和最小值相差 26.4% 。同时，随着周期的减小，管道横向运动频率增加，原本聚集的粒子团受到更强烈的横向流体力作用分散，而不是聚集在管壁，最大体积分数的位置也要更靠近管道中心。

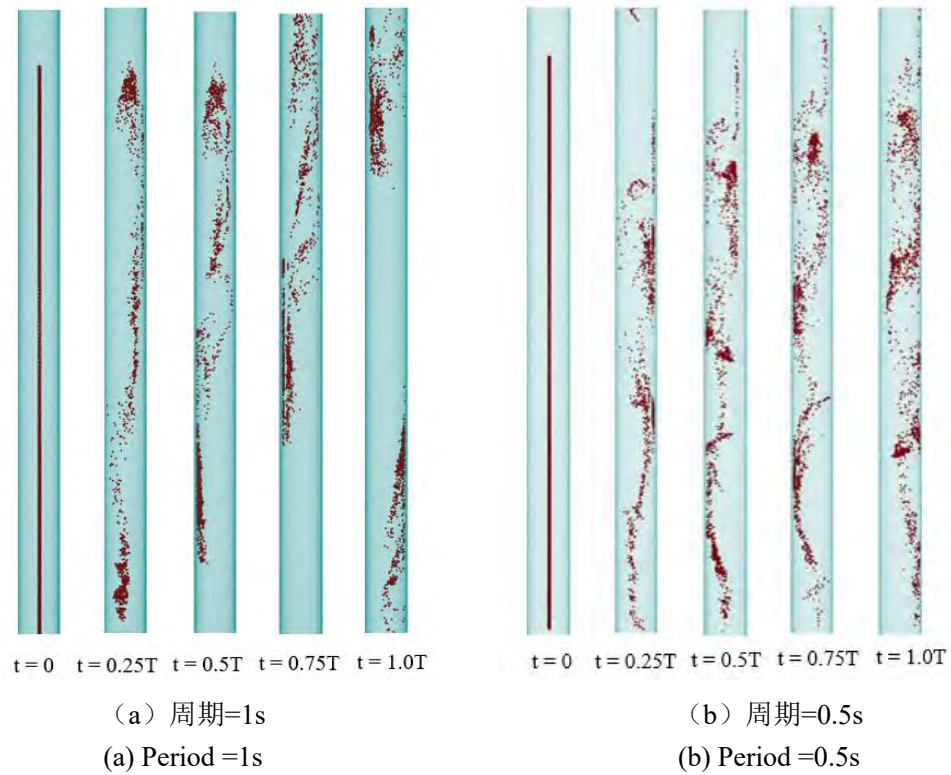


图3-24 不同周期粒子流态图

Fig. 3-24 Particle flow patterns with different periods

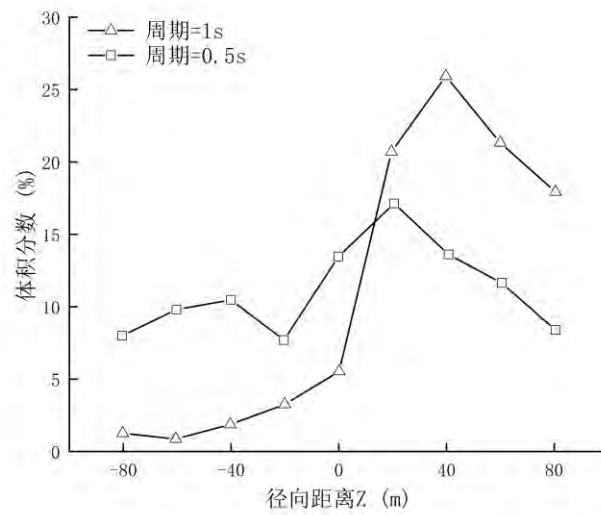


图3-25 不同周期固体粒子体积分数图

Fig. 3-25 Volume fraction of solid particles with different periods

图 3-26 为不同振动周期工况中流场压力损失随时间变化情况。振动周期为 1s 时，流场压力损失随时间波动幅值较大，最大值为 37.1%，最小为 2.4%，平均值为 19.3%。振动周期为 0.5s 时，波动较小，压力损失最大值为 26.1%，最小为 4.4%，平均值为 13.1%，比周期为 1s 工况降低 6.2%。可见，在一定范围内缩小振动周期可以降低流场的能量损失，原因与上述粒子流态分析中固体粒子与管壁之间的碰撞减少和在整体管道中分布均匀有关。

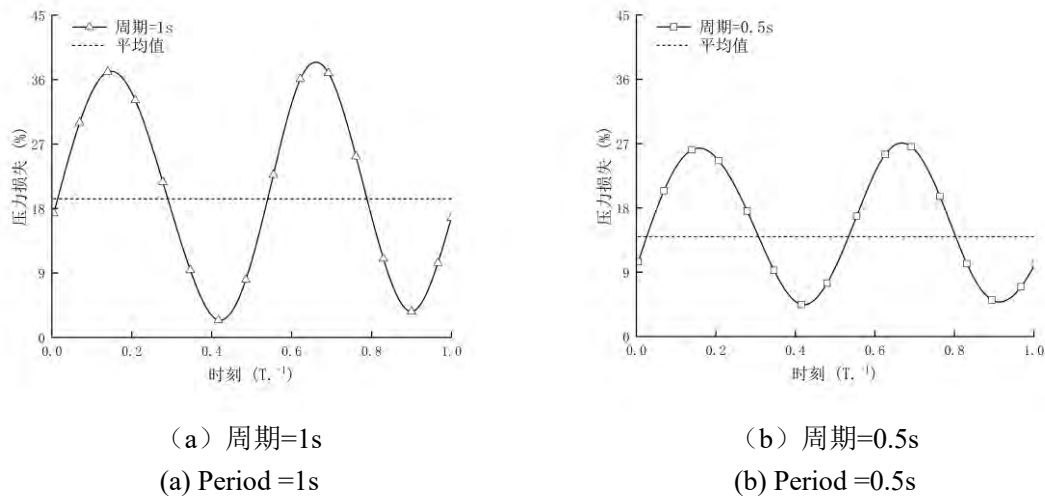


图3-26 不同周期流场压力损失图

Fig. 3-26 Pressure loss with different periods

图 3-27 给出了不同周期下，同一径向截面上固体粒子的速度分布云图。相比不同振幅工况，此时固体粒子的速度分布形态发生了较大改变。周期为 1s 时，固体粒子的速度分布主要集中在管道的上半部分，且最大速度发生在管道上部靠近壁面位置。而当周期为 0.5s 时，固体粒子速度分布有布满整个管道的趋势，最大速度发生在管道中心及上半部分。如果将径向截面平均分为左右两个部分，则可以看到，周期为 1s 工况中固体粒子速度具有较好的对称性，只有管道中心附近存在少量的不对称分布。周期减小则打破了这种对称性，除靠近管壁区域外，速度分布更加随机和混乱，其中管道中心附近不对称性最强。这说明，振动周期的变化将主要影响固体粒子速度的分布形态。

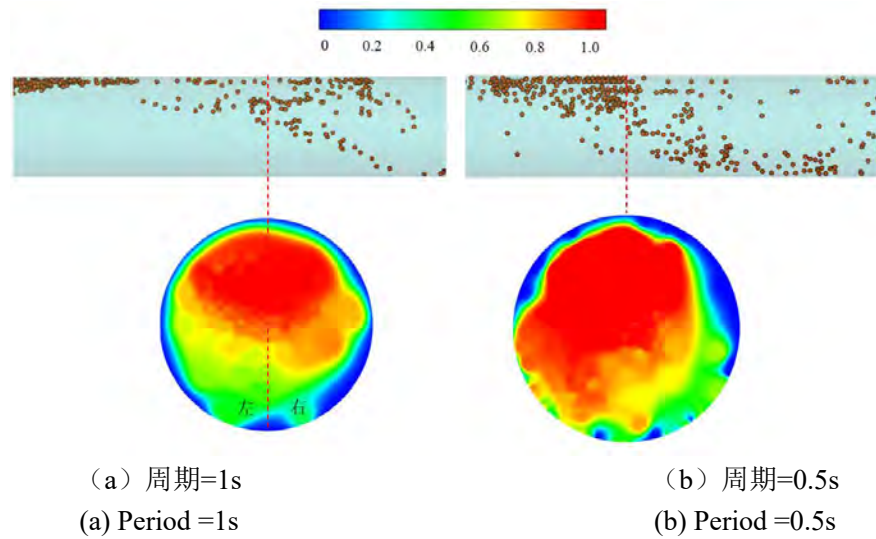


图3-27 不同周期固相速度分布云图

Fig. 3-27 Solid velocity distribution with different periods

图 3-28 为不同周期下固体粒子通过同一位置径向截面的输运速率随时间变化。周期小情况下固体粒子输运速率波动变化小，但更加频繁。周期为 1s 时，输运速率最大值为 $8.4 \text{ dm}^3/\text{s}$ ，最小值为 $2.1 \text{ dm}^3/\text{s}$ ，平均值为 $5.4 \text{ dm}^3/\text{s}$ 。周期为 0.5s 时，输运速率最大值为 $8.9 \text{ dm}^3/\text{s}$ ，最小值为 $4.8 \text{ dm}^3/\text{s}$ ，平均值为 $7.1 \text{ dm}^3/\text{s}$ 。其中，振动周期减小对固体输运速率最小值影响明显，所以，周期减小可以一定程度上提高管道的输运能力。

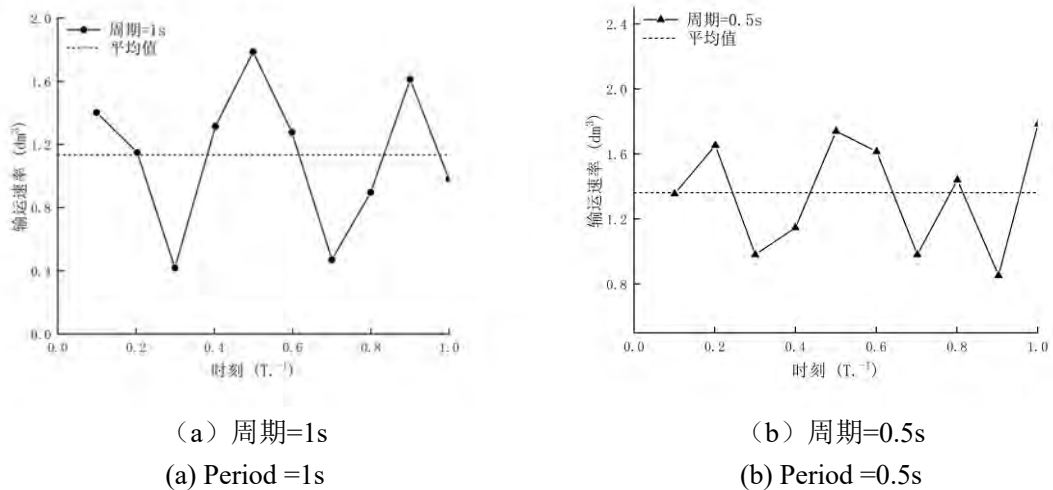


图3-28 不同周期固体粒子输运速率变化图

Fig. 3-28 Flow rate of solid particles with different periods



对管道总体固体粒子的速度和角速度参数进行分析, 图 3-29 为某时刻三维管道的流场示意图。图 3-30 给出了不同周期固体粒子在流场中沿管道径向的速度变化情况。周期为 0.5s 时, 粒子速度波动有所减弱, 最大速度较周期为 1s 工况更接近管道中心。周期为 1s 时, 粒子速度分布出现多个明显的波峰和波谷, 周期为 0.5s 时则速度分布更加均匀。在速度大小方面, 两者相差不多。



图3-29 管道流场示意图

Fig. 3-29 Schematic diagram of pipeline flow field

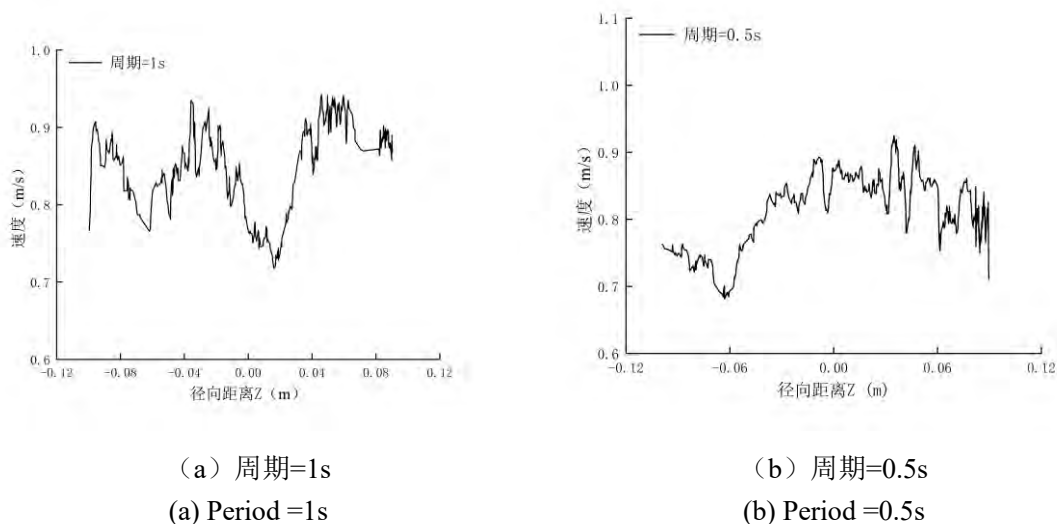


图3-30 不同周期固体粒子速度变化图

Fig. 3-30 Velocity of solid particles with different periods

在固体粒子角速度分布方面不同振动周期管道有着不同的表现,如图3-31所示。相似之处是两工况中均在管道壁面处有最大的角速度,管道中心处的角速度偏低。振动周期为1s时,多数固体粒子的角速度都在20rad/s以下,但在周期为0.5s时,大量粒子的角速度超过了20rad/s,包括管道中心附近部分粒子。这是由于立管频繁的往复运动导致剧烈扰流,固体粒子受到更多的流体力作用产生更大的角速度。

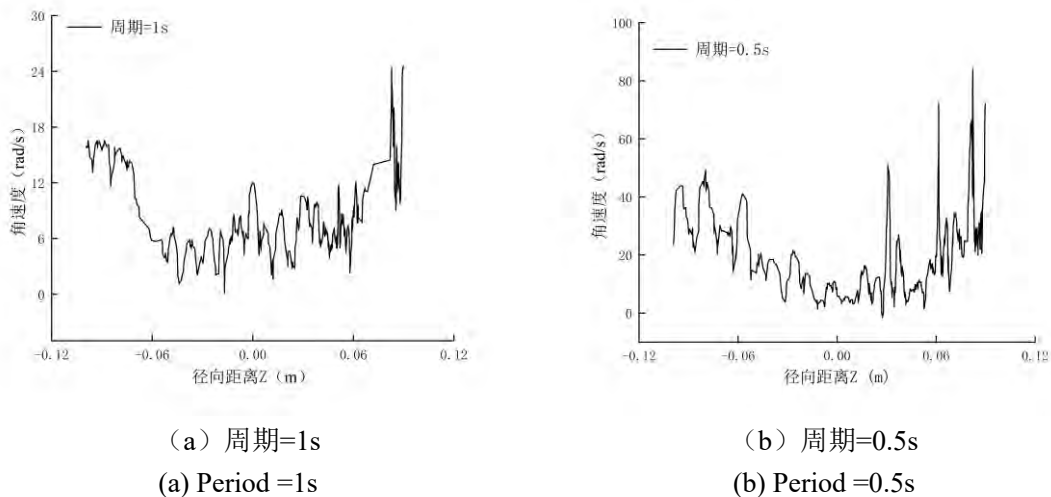


图3-31 不同周期固体粒子角速度变化图

Fig. 3-31 Angle velocity of solid particles with different periods

3.6 本章小结

本章对 MPSDEM-SJTU 求解器在管道流场中的应用进行了验证,并对不同振动形态的三维立管内部流场进行计算分析,包括不同振幅和不同振动周期。从管道粒子流态,速度和角速度分布,压力损失和固体粒子输运速率等方面分析了振动对流场影响规律,并得到以下结论:

(1) 振动导致固体颗粒在管道中的运动方向发生变化,产生更多的径向运动,整体运动变得更加剧烈和无序。与静止管道相比,振动管道中固体粒子与管道发生碰撞,在管壁附近聚集,加剧粒子间作用,导致输运的连续性被打断。

(2) 振动使流场压力损失发生周期性变化,并增加流场的能量消耗。同时降低固体粒子的输运速率。



(3) 固体粒子与管壁碰撞后速度降低, 运动方向改变, 致使最大速度出现在管壁附近, 粒子在管道径向上的速度分布不均匀, 同时固体粒子的角速度增加。此外, 振动也影响液体的速度分布。

(4) 振幅降低会减轻粒子与管壁之间的碰撞, 粒子在管道中分布更加均匀, 输运连续性增加, 管道径向方向上速度分布改善。随着振幅减小, 流场压力损失降低, 固体粒子输运速率升高, 有利于提升管道性能。

(5) 周期减小增加管道横向位移频率, 固体粒子受到更多的流体力作用, 聚集现象减轻, 与管壁的碰撞减小, 使得流场压力损失得以降低和固体输运速率升高。此外, 周期减小会改变速度在径向上的分布形态, 并增加固体粒子的角速度。



第四章 粒子参数对立管流场影响分析

在海洋矿物实际水力输运过程中,由于矿物破碎情况和水力提升系统工作稳定性的不同,很难实现均匀矿物颗粒和稳定输入管道的过程,往往伴随着不同大小矿物颗粒和不同浓度的工作环境。为进一步贴合工程应用实际,本章对不同固体粒子浓度和粒子直径的工况开展计算分析。

4.1 不同固体粒子浓度影响分析

为探究粒子浓度对输运过程影响,通过改变从管道入口处流入的固体粒子数量来实现浓度调整,固体粒子半径不变,仍为 5mm,管道参数和输运速度也与上文相同。本节设置三组不同浓度工况,分别为 10%, 15%, 20%, 其中浓度表示固体粒子体积占总管道的体积比。如表 4-1 所示,其余计算参数与模型参数设置章节相同。图 4-1 为浓度 15%工况三维立管内部流场情况,为方便观察,将管道平方,振动方向为横向,即沿图中 Z 轴方向。

表4-1 不同浓度工况

Table 4-1 Parameters

工况	浓度	振幅/m	周期/s
1	10%	0.1	1
2	15%	0.1	1
3	20%	0.1	1

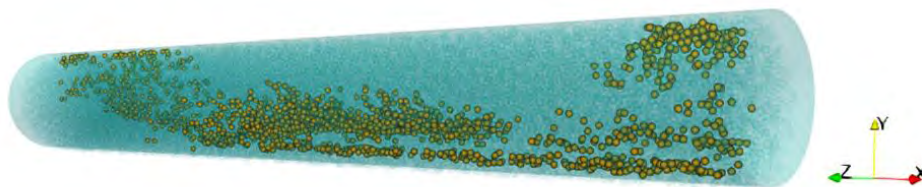


图4-1 三维管道流场示意图

Fig. 4-1 Angle velocity of solid particles with different periods



对横向振动立管内粒子流态进行分析,当流场充分发展,同一时刻不同浓度工况下情况如图 4-2 所示。粒子在管道内出现不同程度的散布,粒子浓度越高,聚集现象越明显,浓度为 10%时,粒子在管壁有小范围的聚集,但当浓度为 20%时,粒子多数聚集在管壁附近,粒子间及粒子与管壁间碰撞加剧,输运过程间断严重,进一步有堵塞管道的风险。此外,在径向上,浓度越高,粒子会充满整个管道,这是因为粒子数增加导致。

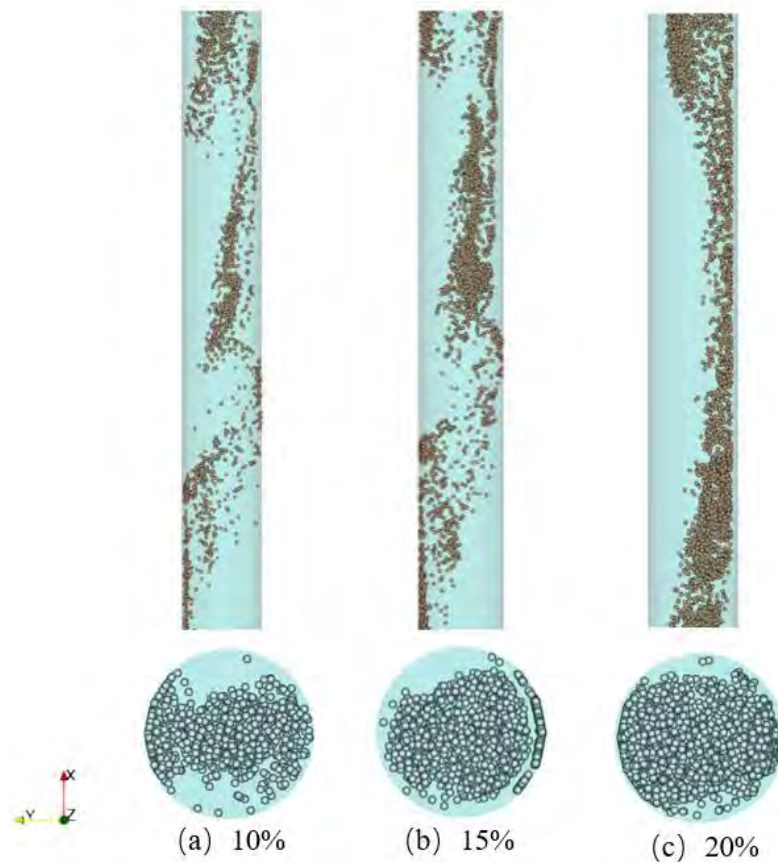


图4-2 不同浓度粒子流态图

Fig. 4-2 Particle flow patterns of different concentrations

图 4-3 为不同固体粒子浓度管道流场压力损失对比。虽然都随管道振动发生周期性变化,但随着浓度的升高,变化周期逐渐减小,压力损失也逐渐升高:浓度为 10%时,平均压力损失为 12.53%;浓度为 15%时,平均压力损失 15.26%;浓度为 20%时,平均压力损失 20.34%。固体粒子数的增多,导致更多固-液相互作用发生,流场因此损失更多压力。

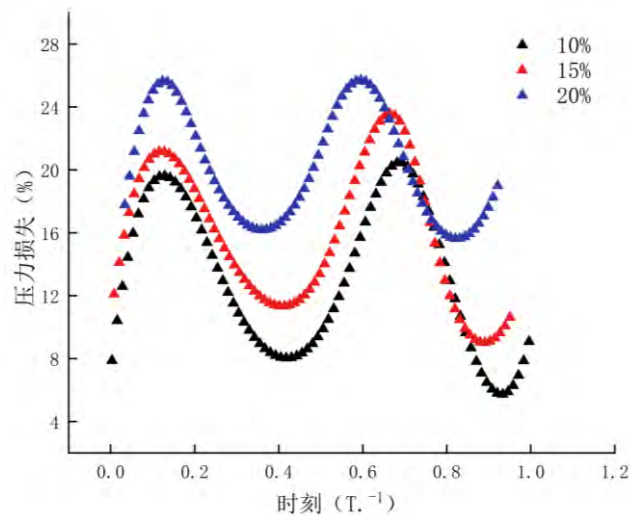


图4-3 不同浓度压力损失变化图

Fig. 4-3 Pressure loss of different concentration

图 4-4 为不同浓度下管道内所有固体粒子的速度波动图，其中径向距离 $Z=0\text{mm}$ 时为管道中心。随着浓度的升高，管道内固体粒子的速度波动和差异有所减小，这可能是因为粒子数的增加加剧了粒子间的相互作用，同时迟滞了粒子的横向位移，使粒子间的速度差距减小。此外，可以看到浓度为 10% 时，绝大部分粒子速度在 0.75m/s 之上，但当浓度升高为 20% 时，粒子速度出现了降低，这说明粒子浓度的升高会降低粒子的运输速度。

图 4-5 给出了不同浓度下立管内固体粒子角速度变化情况。总体上角速度最大的粒子仍位于管壁附近，但随着浓度的升高，粒子角速度波动与速度波动趋势一致，变得更加平缓。在数值上，浓度越高粒子的角速度越高，浓度为 10% 时，粒子角速度分布在 10rad/s 左右，当浓度升高至 20% 时，粒子角速度主要分布在 50rad/s 附近。在分布上，最大角速度粒子随着浓度升高逐渐靠近管道中心，这说明由固体粒子间的碰撞引起的角速度成为主要因素。

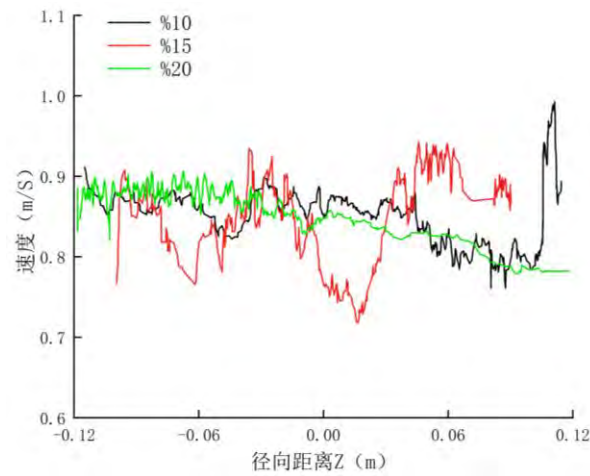
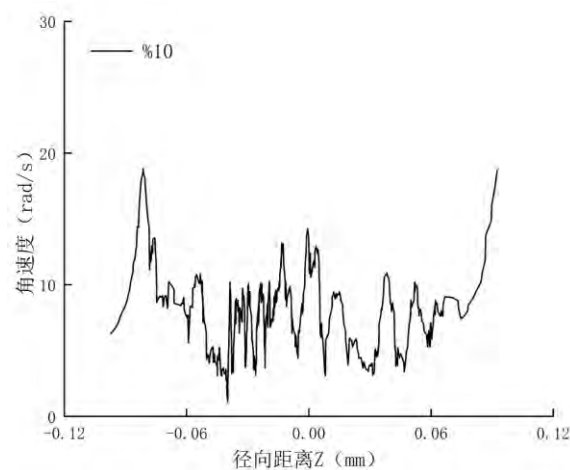


图4-4 不同浓度固体粒子速度分布图

Fig. 4-4 Solid velocity of different concentrations

检测不同浓度工况中同一位置截面的固体粒子输运速率，得到其平均输运速率，如图 4-6 所示。粒子浓度升高，管道内粒子数增加，其固体粒子输运速率也随之升高。但其升高的幅度逐渐降低，浓度为 15%比浓度为 10%的输运速率提升 40.1%，浓度为 20%比浓度为 15%的输运速率提升 12.6%，这与上文分析中固体粒子速度的降低和管道流场压力的损失情况有关。



(a) 浓度=10%

(a) Concentration=10%

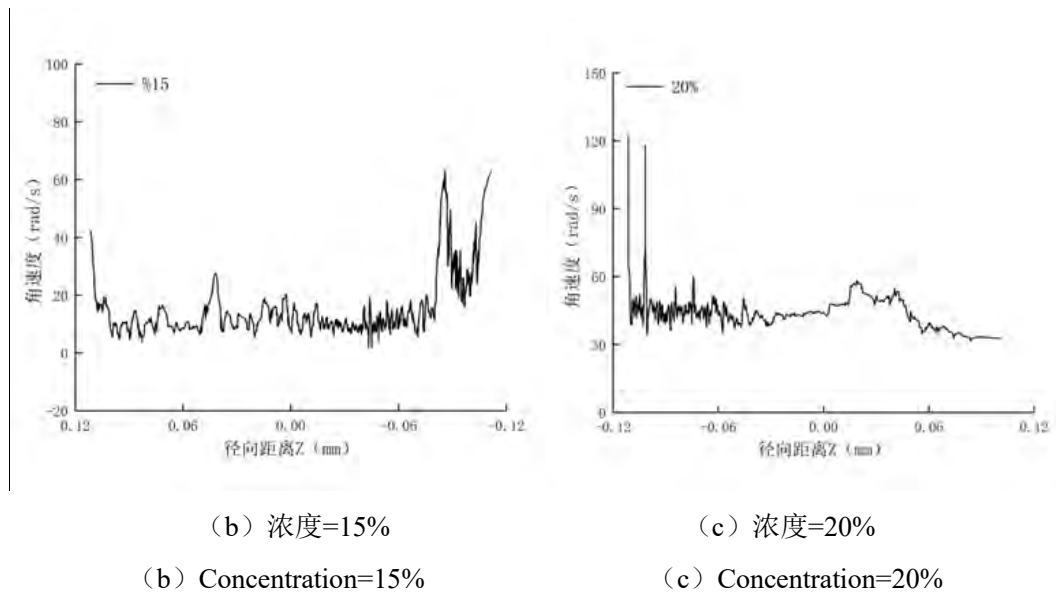


图4-5 不同浓度固体粒子角速度分布图

Fig. 4-5 Solid angle velocity of different concentrations

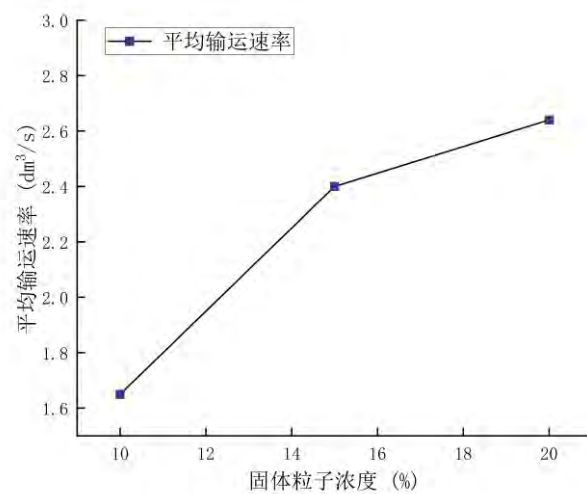


图4-6 不同浓度固体粒子输运速率图

Fig. 4-6 Flow rate of solid particles angle of different concentrations

4.2 不同固体粒子直径影响分析

由于破碎效果的不同，输送进立管的矿物颗粒的直径和形状可能不同，本节主要针对不同直径的球形固体粒子开展数值计算分析，如表 4-2 所示，设置三组工况，粒



子直径分别为 3mm，6mm 和 9mm。流体速度为 1m/s，固体粒子数量采用 $3 \times 3 \times 300$ 的形式，管道振动方向及振动形态与 4.1 节中相同。

表4-2 不同粒径工况

Table 4-2 Parameters

工况	粒子半径	振幅/m	周期/s
1	3mm	0.1	1
2	6mm	0.1	1
3	9mm	0.1	1

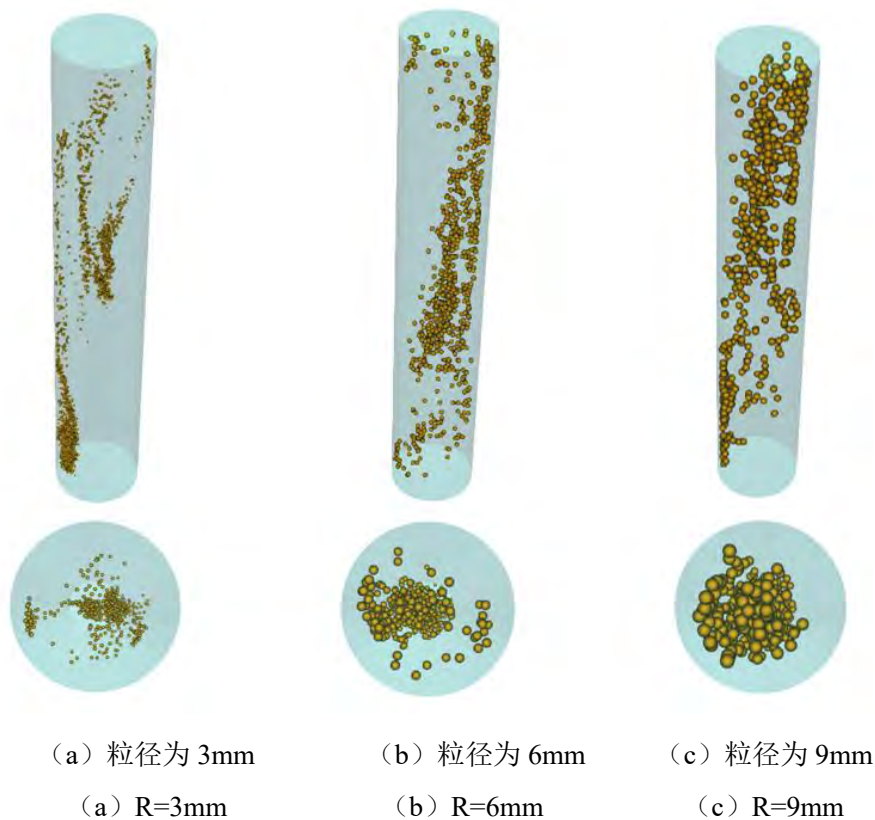


图4-7 不同粒径管道流场图

Fig. 4-7 Flow field diagram of pipes with different particle sizes

图 4-7 为不同固体粒子直径工况下管道流场情况，可以看到，固体粒子大小的改变导致不同的流场特征。粒径为 3mm 时，粒子输运呈现聚集和分散并存的形态，且

多数粒子在管壁附近，输运不连续。当粒子直径增大时，其在管道中的散布趋向于充满整个管道，并伴随移动向管壁的粒子减少。

为进一步了解不同粒径固体粒子在振动工况中的运动散布特点，取粒径为 3mm 和 9mm，对同一周期不同时刻的粒子流态进行分析，如图 4-8 所示。通过对不同时刻进行对比，固体粒子在立管中的流动和分布方式更加直观。粒径为 3mm 时，粒子流随时间波动变化大，不同时刻均在管壁附近形成较大数量的聚集，在管道中间也有大规模的粒子团。粒径为 9mm 时，由于粒子的增大，体积增加，其输运过程具有明显的连续性，在管壁处同样出现粒子聚集现象，但粒子同时在管道中间附近有较大范围的散布，总体来看，固体粒子横向位移幅度要小于 3mm 工况，且有在管道中间流动的趋势。上述粒子流态的不同可能是由于粒子质量不同导致，3mm 粒径粒子具有更小的质量，其惯性更低，在受到周围流体力作用时，更容易发生横向位移。而 9mm 粒径固体粒子具有更好的抵抗横向流体力的能力。此外，大粒子工况固体粒子间作用更剧烈，与流体力共同作用也是导致其流态分布复杂的重要原因之一。

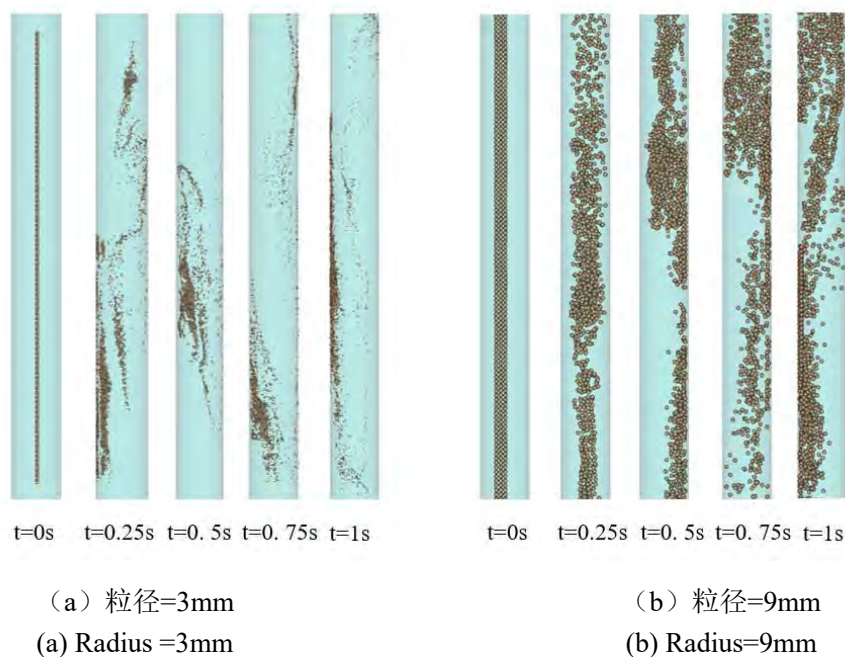


图4-8 不同粒径管道粒子流态图

Fig. 4-8 Particle flow patterns in pipelines with different particle sizes

以一米长管道流场为研究对象，如图 4-9 左侧管道所示，测量其不同时刻压力损失，得到如图 4-9 右侧所示不同时刻压力损失情况。三种不同粒径工况中，流场压力



损失变化趋势基本一致，随时间发生波动。压力损失的大小不同，粒径为 3mm 时，其平均压力损失为 9.12%，粒径为 6mm 时，平均压力损失为 18.25%，粒径为 9mm 时，平均压力损失为 34.37%。可见大粒径固体粒子在输运过程中，对流场的能量有更大的需求，而能量的消耗有两部分原因，除固体粒子之间及粒子与管壁之间的碰撞外，固体粒子与流体的动量交换也起到很大作用，如图 4-7 所示，大粒径工况中粒子与流体之间的接触面积更大，存在更多的动量交换，因此造成了总体流场更多的压力损失。

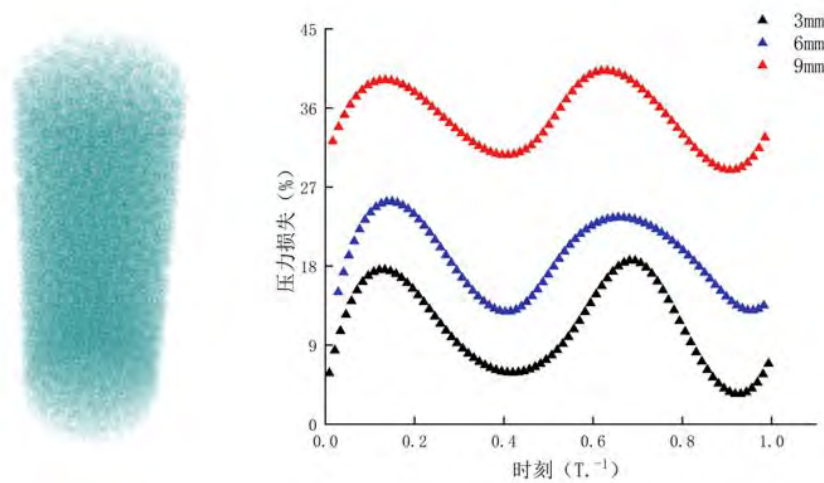


图4-9 不同粒径流场压力损失图

Fig. 4-9 Pressure loss diagram of flow field with different particle sizes

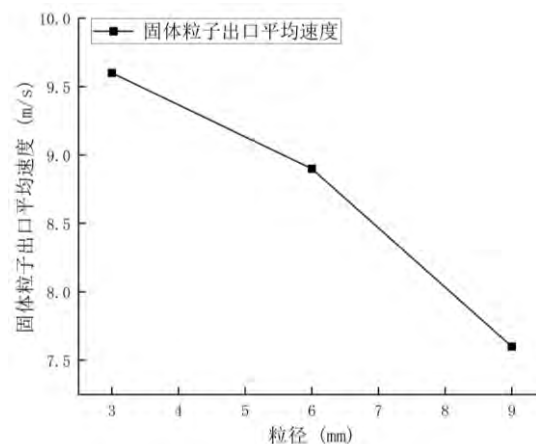


图4-10 不同粒径粒子出口平均速度对比图

Fig. 4-10 Comparison chart of average export speed

管道出口的固体粒子速度对分析输运情况有比较重要的参考意义,图 4-10 给出了不同粒径固体粒子在管道出口的平均速度变化。可以看到,随着粒径的增大,固体粒子速度降低,在粒径为 9mm 工况中,固体粒子出口平均速度仅为 7.61m/s,与 1m/s 的输运速度差距较大,这与粒子较大的质量和剧烈的碰撞有关。在实际工程中,应尽量将矿物破碎到较小的形式进行输运。

取相同位置管道截面测量一段时间内固体粒子的输运量,得到固体粒子的平均输运速率,如图 4-11 所示。粒径为 3mm, 6mm 和 9mm 工况的粒子平均输运速率分别为 $1.2\text{dm}^3/\text{s}$, $3.6\text{dm}^3/\text{s}$, 和 $4.9\text{dm}^3/\text{s}$, 其随着粒径的增加而升高,这是由于粒子的体积增加,如图 4-10 中分析的结果所示,其增加速率随着粒径增加反而降低。结合前文中对不同浓度的分析可知,在实际工程应用中可采取减小粒径,适当增加浓度的方法来提高固体粒子的输运速率。

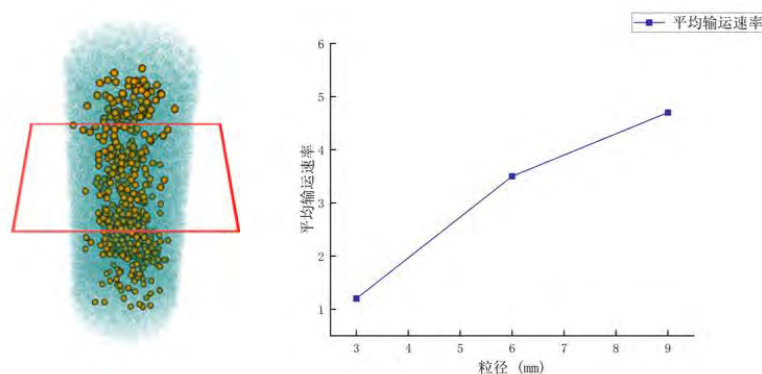


图4-11 不同粒径输运速率对比图

Fig. 4-11 Comparison chart of average flow rate of solid particles

4.3 本章小结

本章针对不同固体粒子参数的工况开展计算研究工作,主要分析了不同固体粒子浓度和不同固体粒子粒径对管道流场和输运效果的影响,浓度分别为 10%, 15%, 20%。粒径大小分别为 3mm, 6mm, 9mm。得到了以下结论:

(1) 不同浓度工况中,粒子在管道内出现不同程度的散布,粒子浓度越高,聚集现象越明显,当浓度为 20%时,粒子多数聚集在管壁附近,粒子间及粒子与管壁间碰撞加剧,输运过程间断严重。

(2) 粒子浓度增加,会产生更多的固-液相互作用,导致流场的压力损失增加。



(3) 粒子浓度的升高会降低粒子的输运速度,同时增加固体粒子的转动角速度。此外,粒子浓度升高,管道内粒子数增加,其固体粒子输运速率也随之升高,但增幅逐渐减小。

(4) 小粒径工况输运不连续性强,当粒子直径增大时,其在管道中的散布趋向于充满整个管道,移动向管壁的粒子数会减少,有更多的粒子在管道中心附近流动。

(5) 随着固体粒子粒径增加,粒子与流体之间的接触面积更大,存在更多的动量交换,这造成了总体流场更多的压力损失。

(6) 粒径增加会大幅度减小固体粒子的出口速度,同时增加其输运速率。



第五章 振荡影响下倾斜管道数值模拟

用于深海采矿的立管往往采用柔性材料，长度可达数千米，在受到海洋中流体力作用发生振动的过程中，管道会出现倾斜，倾斜管道中流场与垂直立管有诸多不同，本章针对倾斜管道开展计算研究，分析了静止与振动管道的特点，并对振动方向和管道倾角不同的影响进行总结分析。

5.1 静止倾斜管道数值模拟研究

为了解倾斜管道内部流场特征，首先对静止倾斜管道进行计算分析，并观察倾斜角度对管道流场的影响，物理模型如图 5-1 所示，管道长度 L 为 4m。本节设置四组对比工况，计算参数如表 5-1 所示，管道倾角从低到高为 10° ， 30° ， 45° ， 70° ，固体粒子浓度为 10%。

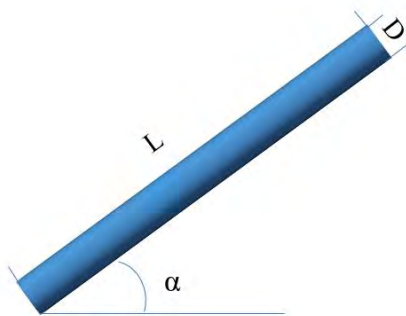
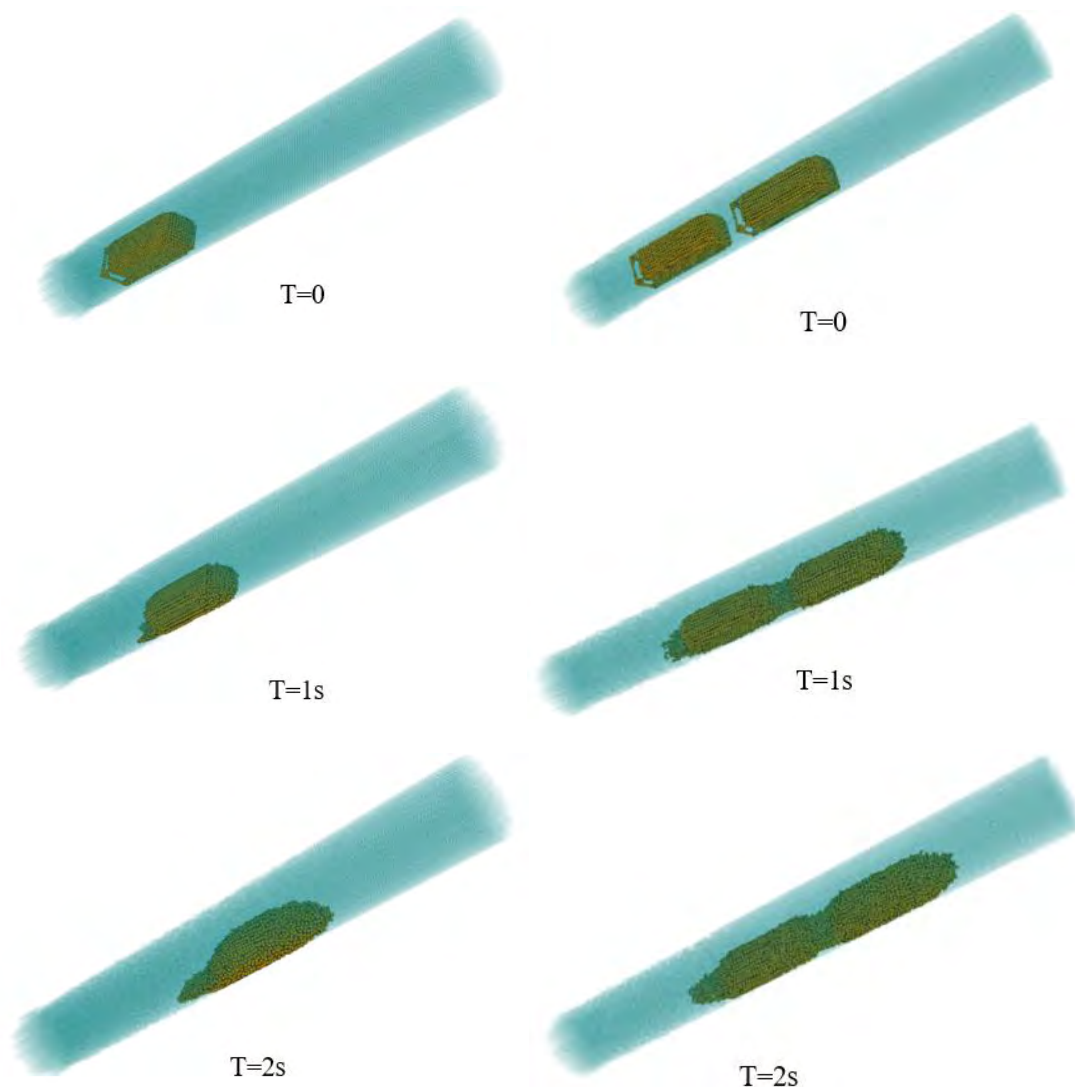


图5-1 倾斜管道物理模型
Fig. 5-1 Physical model of inclined pipeline

表5-1 不同倾斜角度工况
Table 5-1 Different inclination angles

工况	倾角 $\alpha / ^{\circ}$	计算参数	数值
1	10	粒径	5mm
2	30	输运速度	1m/s
3	45	粒子浓度	10%
4	70	管道半径 D	0.1m

为了解倾斜管道中固体粒子在流场中的发展情况,采用两种初始时刻粒子分布方式进行对比分析,图 5-2 左侧为集中分布,图 5-2 右侧为分段分布,管道倾角取 10° 。图 5-2 则给出了不同初始时刻粒子分布方式对固体粒子输运发展影响。可以看到,采用集中输入管道的粒子在流场中发展缓慢,在 3s 时仍为非均质流动,大量粒子聚集形成较厚的粒子床,不利于输运的进行。采用分段输入管道的粒子流态较为均匀,但从 $T=1\text{s}$ 开始,两部分粒子接触,前一部分粒子阻滞了后一部分粒子的输运,尽管逐渐过渡到均质流动,但两部分粒子间仍存在明显的分界。以上结果分析显示,在将矿物颗粒输运至管道中时,要尽量避免大量粒子的快速输入,应保持均匀地持续输入,以保证输运的有效性。



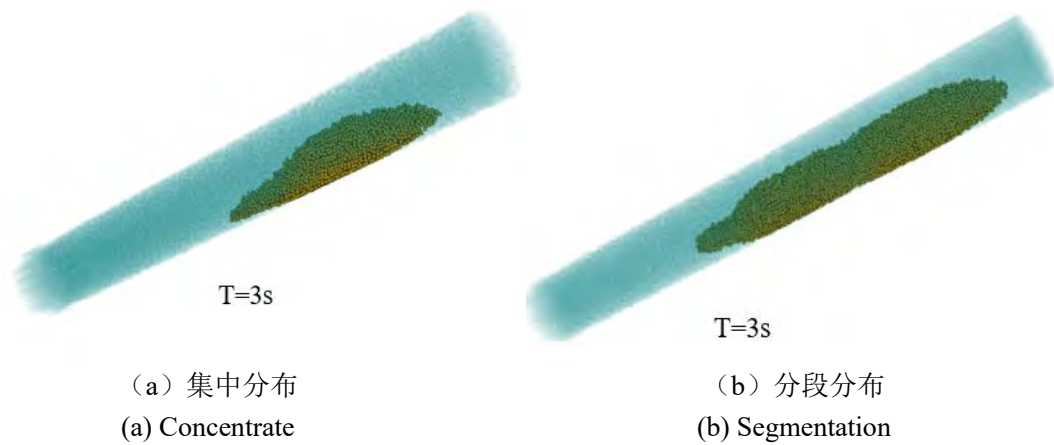
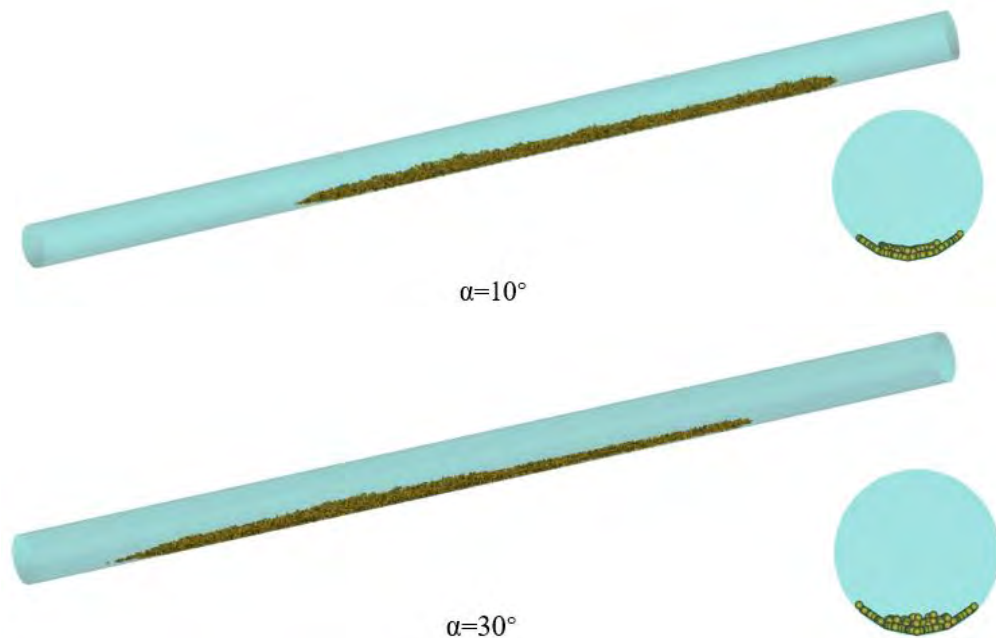


图5-2 不同初始时刻粒子分布发展

Fig. 5-2 Development of particle distribution

图 5-3 为流场充分发展时，不同倾角静止管道内部固体粒子流态情况。从图中可以看到，固体颗粒在管道中呈现为连续的均质流动。随着管道倾角的增大，固体颗粒与管壁的接触面积减小，颗粒在管道径向上的散布距离增大，在倾角为 70° 的管道中，部分粒子悬浮流动，这使固体颗粒与管壁的碰撞接触减小，减少了动能损失和与管壁之间的碰撞摩擦损失。



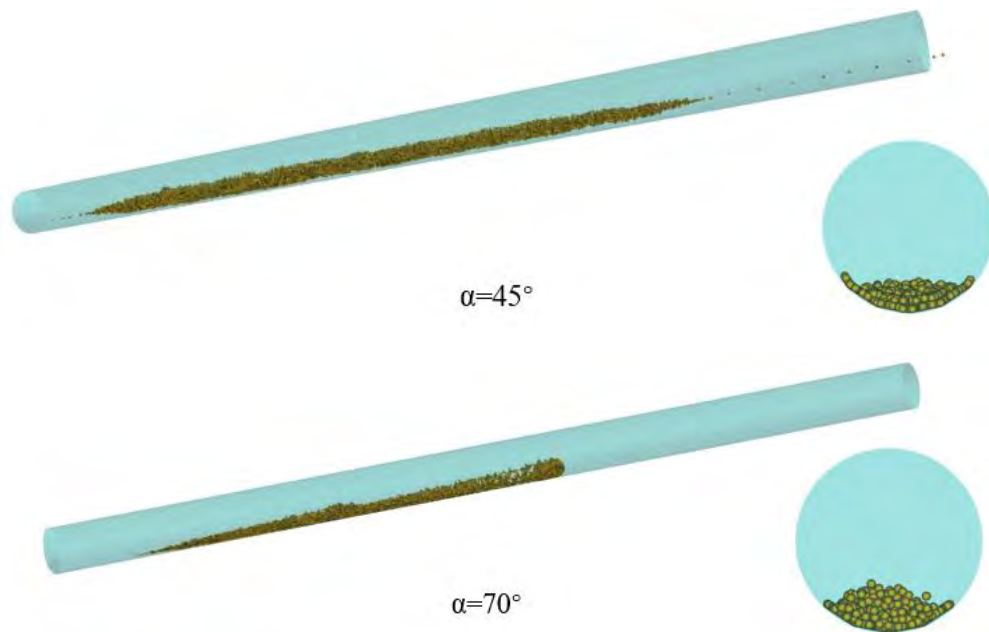
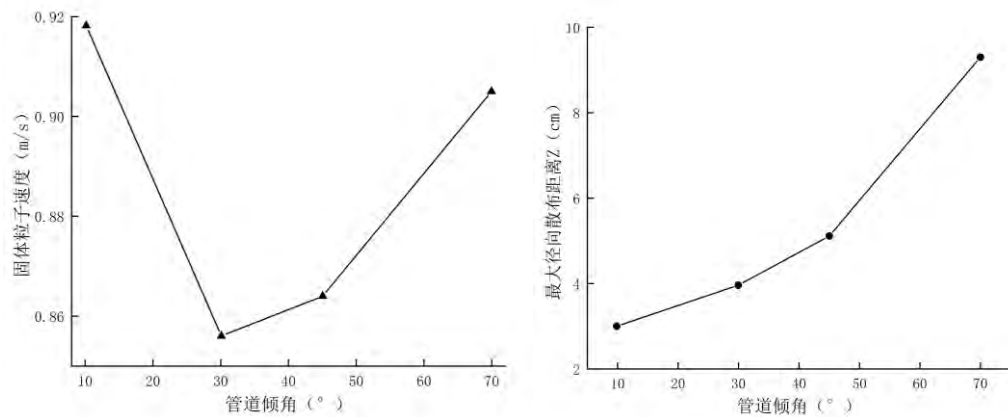


图5-3 不同倾角管道粒子流态图

Fig. 5-3 Particle flow patterns in pipes with different inclination angles

图 5-4 给出了不同倾斜角度下管道内固体粒子的平均速度大小和径向距离散布情况。固体颗粒的平均速度随着管道倾角的增大先减小后增大，在倾角为 30° 时具有最小值。这可能是因为倾角为 30° 的管道中的固体粒子不仅具有更大的碰撞和摩擦损失，同时其也受自身重力影响阻滞了流动过程。图 5-4 (b) 为固体粒子在管道径向上的最大散布距离变化，随着管道倾角的增加，最大散布距离增大，这是因为在径向上重力减弱和流体力共同作用下，粒子不再沉积到管壁，而是趋于悬浮流动，这种流态具有较好的输运效果。

图 5-5 为固体粒子角速度在不同倾角管道中的分布情况。从图中可以看到，靠近管壁的粒子具有更大的角速度，这是因为与管壁的碰撞过程中粒子的运动方向改变导致的。此外，当管道倾角为 70° 时，总体上固体粒子的角速度最小，当倾角为 30° 时，粒子角速度最大。一定程度上固体粒子的角速度大小可以代表固体粒子与管壁碰撞的剧烈程度。因此，在考虑管壁磨蚀的情况下，保证更大倾角的工况是一个更好的选择。



(a) 固体颗粒平均速度

(b) 颗粒径向散布距离

(a) Average velocity of solid particles

(b) Radial dispersion of particles

图5-4 固体粒子的速度与分布情况

Fig. 5-4 Velocity and distribution of solid particles

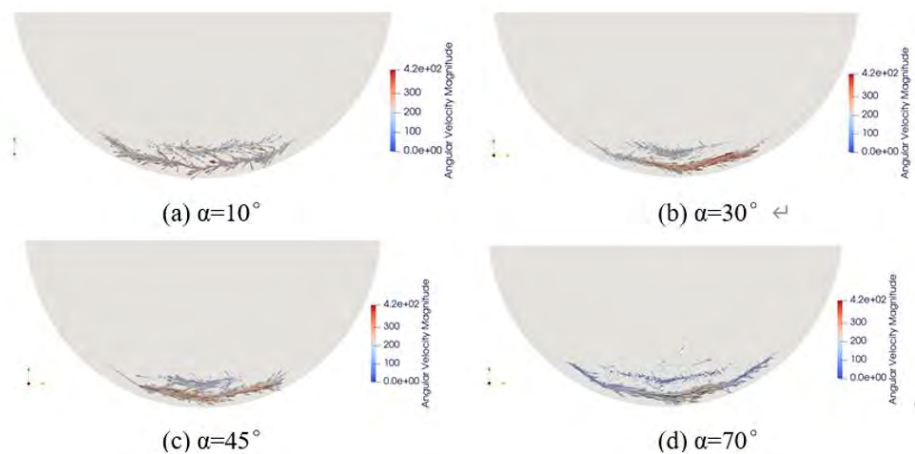


图5-5 固体粒子的角速度分布图

Fig. 5-5 Distribution of angular velocity of solid particles

5.2 静止与振动倾斜管道对比分析

在上述静止倾斜管道分析基础上,对振动倾斜管道进行计算分析。设置两组工况,如表 5-2 所示。其余计算参数与 5.1 节相同,计算模型如图 5-6 所示,振动方向为沿 Y 轴的横向振动。



表5-2 静止与倾斜工况设置

Table 5-2 Parameters

工况	倾角	振动周期	振幅
1	30°	—	—
2	30°	1s	0.1m

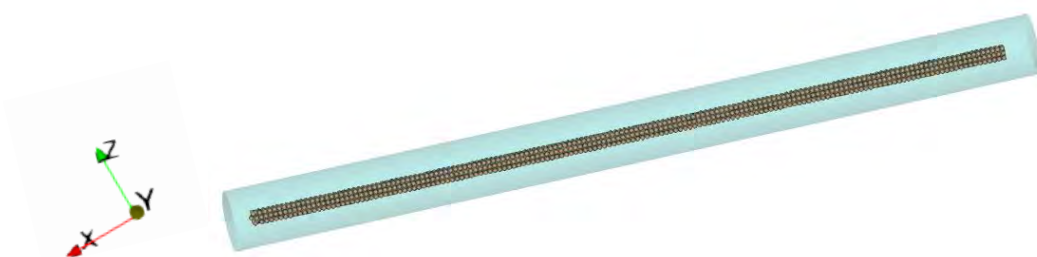


图5-6 计算模型

Fig. 5-6 Calculation Model

在时间 $t=10s$ 时，取管道内部固体粒子流态进行分析，如图 5-7 所示。静止管道内部粒子偏向于均质流动，而振动会导致粒子分布不均匀和堆积。在静止管道中，固体粒子在轴向方向上散布较均匀，输运连续性好。在振动管道中，由于受到沿 Y 轴方向的横向流体力作用，粒子不仅在管道底部壁面聚集，也分布在管道两侧的壁面附近，粒子与管壁碰撞加剧，损失更多的速度动能，输运连续性较差。此外，振动管道中可以观察到部分固体粒子呈现悬浮流动。

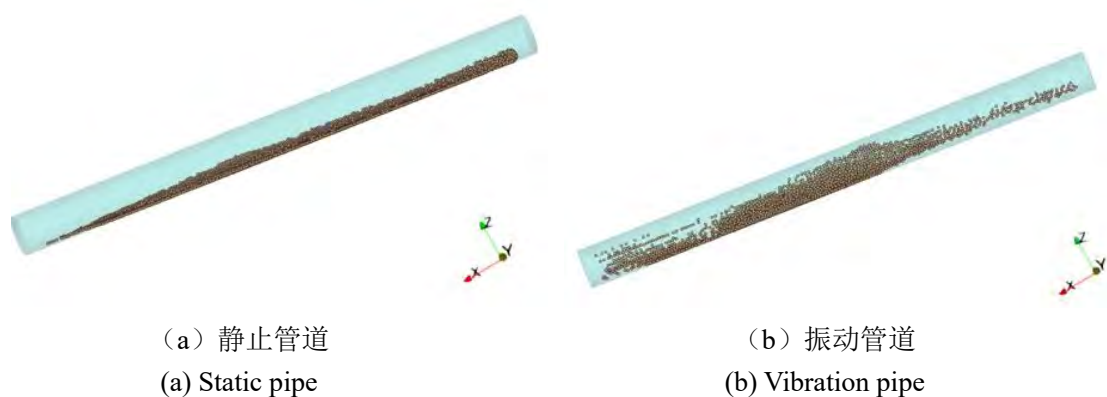
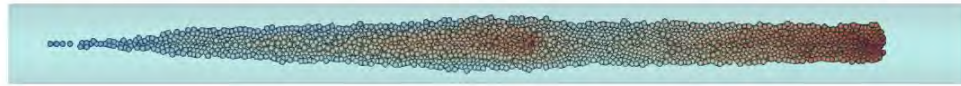


图5-7 静止与振动管道粒子流态

Fig. 5-7 Particle flow patterns in stationary and vibrating pipelines

图 5-8 为固体粒子速度分布情况。在静止管道中，固体粒子的最大速度在粒子留的中心部分，且速度分布较均匀。在振动倾斜管道中，粒子速度在不同位置出现波动变化，管道壁面附近粒子速度更大，中部速度粒子速度较小。



(a) 静止管道

(a) Static pipe

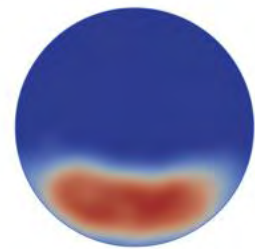
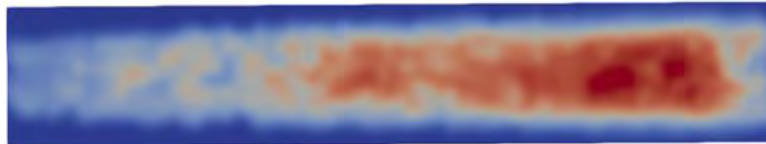


(b) 振动管道

(b) Vibration pipe

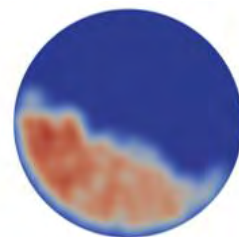
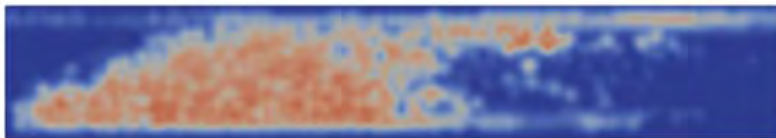
图5-8 固体粒子速度分布图

Fig. 5-8 P Solid particle velocity distribution



(a) 静止管道

(a) Static pipe



(b) 振动管道

(b) Vibration pipe

图5-9 固体粒子速度云图

Fig. 5-9 P Solid particle velocity distribution



图 5-9 为不同工况下管道的横纵剖面上的固体粒子速度云图。从图中可以更明显看到固体粒子速度的分布情况。在径向剖面中，静止管道的速度分布具有对称性，即剖面左右部分速度分布相似。但在振动倾斜管道中，速度分布不再具有对称性，这是由于固体粒子的横向位移影响了速度分布。此外，静止管道中的速度要明显大于振动管道中的情况，特别是在最大速度的数值上，这也说明振动导致倾斜管道中的粒子损失了部分动能，进而速度降低。

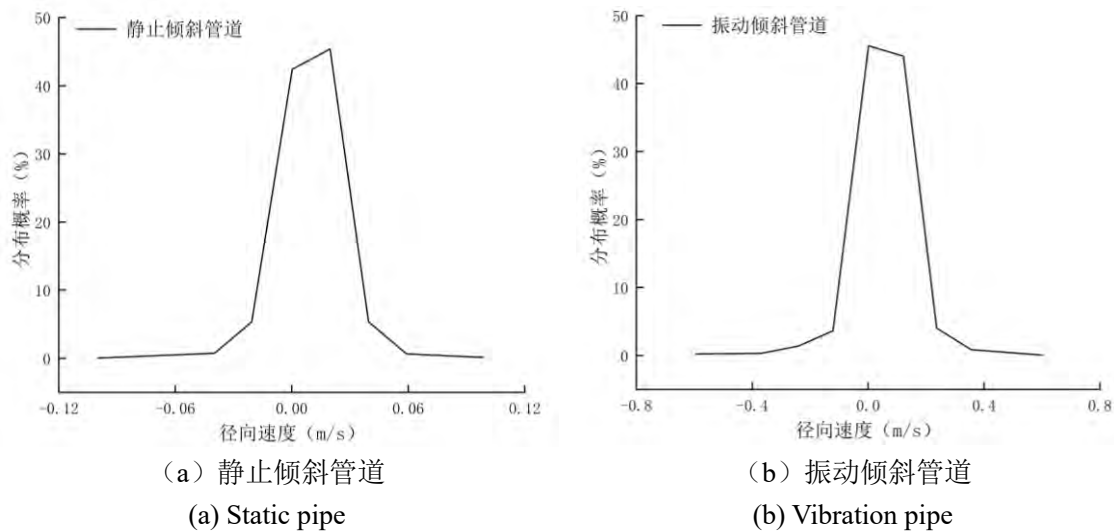


图5-10 固体粒子径向速度概率分布

Fig. 5-10 Probability distribution of radial velocity of solid particles

进一步分析粒子在径向上的速度情况，即沿振动方向 Y 轴方向上的速度概率分布，如图 5-10 所示，对管道中所有固体粒子的径向速度的分布概率进行统计。可以看到，横向振动条件下，两种工况径向速度分布趋势大概相同，大部分固体粒子的径向速度在相对较小的范围内变化，少部分固体粒子具有较大的径向速度。但振动情况下的径向速度要远大于静止管道内的粒子径向速度，这说明振动使粒子的部分动能转变为径向速度。

5.3 不同振动方向对倾斜管道流场影响

在三维海洋环境中，振动的来源有多个方向，本节取相互垂直的横向和纵向两个工况进行分析，如表 5-3 所示，其中横向振动沿坐标 Y 轴方向，纵向振动沿坐标 Z 轴方向，不同振荡方向如图 5-6 中的坐标轴和模型示意图所示。

表5-3 不同振动方向设置

Table 5-3 Different vibration direction settings

工况	振动方向	振动周期	振幅
1	横向（沿 Y 轴）	—	—
2	纵向（沿 Z 轴）	1s	0.1m

图 5-11 为不同振动方向倾斜管道内固体粒子流动状态。纵向振动产生非均质悬浮流动，可以明显看到，固体粒子更充分地布满管道流动，与液体粒子之间的接触更加充分，有利于动量的交换，粒子不仅与管道下壁面碰撞，也与管道上壁面发生碰撞接触。纵向振动时，受到粒子本身重力影响，分布在管道下半部分的粒子数量更多，而在横向振动中，粒子更多在管道下半部分输运流动。



(a) 横向振动

(a) Transverse vibration



(b) 纵向振动

(b) Longitudinal vibration

图5-11 不同振动方向粒子流态

Fig. 5-11 Particle flow patterns in different vibration directions

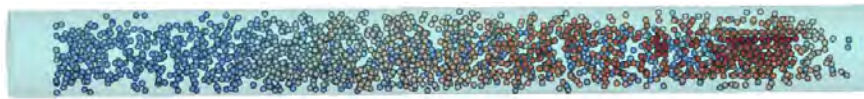


图 5-12 给出了不同振动方向上固体粒子的速度分布情况，在纵向振动工况下，管道中心附近固体粒子具有更大的速度，而不再是管壁附近，且纵向振动的速度分布均匀一些。



(a) 横向振动

(a) Transverse vibration



(b) 纵向振动

(b) Longitudinal vibration

图5-12 不同振动方向固体粒子速度分布图

Fig. 5-12 Solid particle velocity distribution in different vibration directions

以一段管道截面为对象，分析同一位置上固体粒子的体积分数随径向距离 Z 的变化，如图 5-13 所示，其中 $Z=10\text{cm}$ 时为管道中心。当倾斜管道发生纵向振动时，管道内不同位置体积分数变化较小，总体变化保持均匀，在管道中心处具有较多的粒子散布，且从管道下壁面至管道上壁面都有固体粒子分布。当倾斜管道发生横向振动时，固体粒子的体积分数变化幅度大，大量粒子在管道下壁面附近流动，管道中心附近粒子数最少，这也说明粒子分布的不均匀。

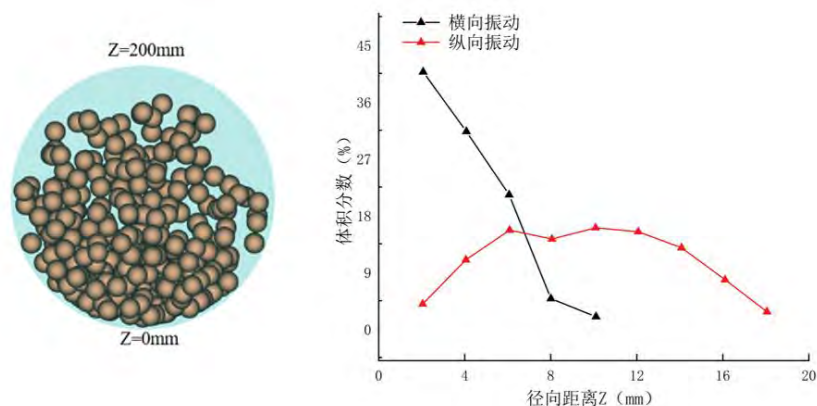


图5-13 不同振动方向固体粒子体积分数分布图

Fig. 5-13 Solid particle volume distribution in different vibration directions

图 5-14 为固体粒子的输运速率对比情况。粒子的通过量随时间发生变化,当振动方向为横向时,固体粒子输运峰值为 $1.09\text{dm}^3/\text{s}$,平均值为 $0.78\text{dm}^3/\text{s}$,当振动方向为纵向时,固体粒子输运速率峰值为 $1.38\text{dm}^3/\text{s}$,平均值为 $1.05\text{dm}^3/\text{s}$ 。可见,相同环境下,纵向振动更有利于固体粒子的输运。

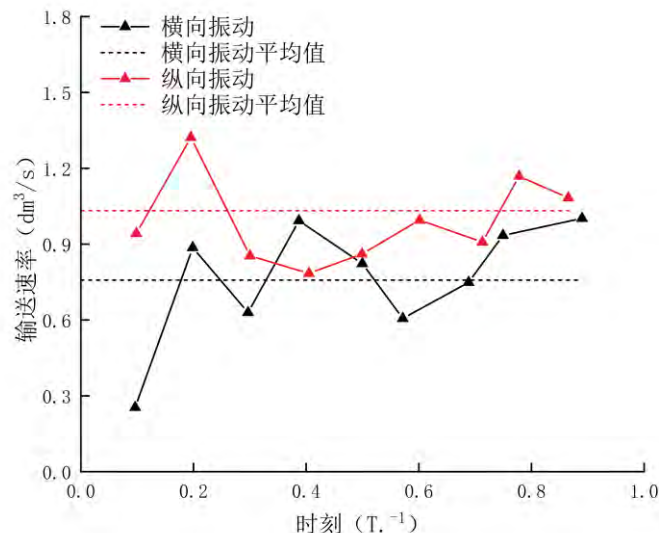


图5-14 不同振动方向固体粒子输运速率变化

Fig. 5-14 Flow rate of solid particles

5.4 本章小结

柔性海洋立管在振动过程中往往会出现倾斜情况,了解倾斜工况下粒子输运和流场变化情况对分析水力输运系统特性有重要补充作用,本章将柔性立管简化为 4m 长的刚性倾斜管道,对静止倾斜管道,振动倾斜管道,不同振动方向影响等方面进行计算分析,并得到以下结论:

(1) 在静止倾斜管道中,保证粒子输入管道的均匀持续有利于提高输送效率。流场充分发展后,固体粒子在管道中呈现均质流动状态,倾角越大,固体粒子与管壁碰撞接触面越小,速度越大,输运速率升高,同时粒子角速度减小,因此要尽量避免小倾角情况出现。



(2) 倾斜管道横向振动导致部分固体粒子悬浮流动, 固体粒子与管壁碰撞加剧, 动能损失大, 输运连续性差。此外, 管壁附近粒子具有较大速度, 受横向流体力作用, 粒子在具有更大的径向速度。

(3) 纵向振动使粒子在管道中分布更加均匀, 更多粒子在管道中部流动, 管道中心粒子具有较大速度, 且输运速率比横向振动工况提升。



第六章 总结与展望

6.1 总结

深海采矿以立管作为主要载体进行矿物颗粒的水力输运,管道内部流场涉及复杂的流-固耦合问题。在海洋工作环境中,立管会受到海底剪切流等水动力作用,并形成振荡运动,立管进行不规则运动,影响内部流场,这增加了对立管内部输运情况的研究难度。本文在验证求解器 MPSDEM-SJTU 精度基础上,针对垂直管道,倾斜管道,不同粒子参数管道等不同工况开展了计算研究工作,得到了固体粒子流态,固体速度分布,流场压力损失等变化规律,具体结论如下:

(1) 在求解器验证方面,已经对溃坝等实验进行了计算对比,取得了良好的效果。本文进一步对管道流场应用场景进行了验证,共分为两部分。第一部分为泊肃叶流计算,将数值模拟结果与解析解进行了对比分析,数据具有较好的吻合度。第二部分对静止立管的输运实验进行对比,以固体粒子速度分布为参照对象,误差在 10% 以内,可以进行管道流场计算研究。

(2) 在振荡与静止立管对比工况中,振荡使固体粒子发生横向位移,与管壁发生碰撞,流场压力损失增大,管壁附近固体粒子体积分数增加,粒子流输运的连续性被打断。在速度方面,静止管道中管道中心粒子速度最大,而振动使管壁附近的粒子具有较大的速度,这是因为粒子与管壁碰撞后损失动能和改变运动方向,在碰撞前具有最大的速度。振动立管的平均固体速度要小于静止立管,输运速率也要低于静止立管,在振动的同一周期不同时刻,固体粒子速度分布出现波动。在角速度方面,与速度分布相似,振动工况中由于碰撞,壁面附近固体粒子角速度最大,而静止立管中心处粒子有较大的角速度,在量级上,振动立管中粒子角速度要远大于静止立管。在不同振动形态工况中,主要包括了不同振幅和不同振动周期。振幅不同时,随着振幅减小,固体粒子与管壁碰撞区域减小,粒子流态更加均匀,管道中心处粒子速度增加。此外,减小振幅还会降低流场的压力损失,减小输运速率波动,增加输运量和减小角速度。周期不同时,周期减小,粒子受更频繁的横向流体力作用,粒子分散更加均匀,输运连续性较好。同时,减小周期可以减小流场压力损失的波动和大小,增加输运量,但也会改变速度分布的对称性以及增加固体粒子的角速度。



(3) 在不同固体粒子参数工况中, 主要分析了不同固体粒子浓度和不同固体粒子直径的影响。浓度不同时, 粒子浓度越高, 聚集现象越明显, 当浓度为 20% 时, 粒子多数聚集在管壁附近, 粒子间及粒子与管壁间碰撞加剧, 输运过程间断严重。粒子浓度增加也会导致更多的固-液相互作用产生, 流场压力损失增加, 固体粒子角速度升高。粒径不同时, 粒径增加导致粒子更多在管道中心附近流动, 同时会大幅度减小固体粒子的出口速度, 同时增加其输运速率。

(4) 在倾斜管道工况中。将静止与振动管道进行对比分析, 结果显示, 保证粒子输入管道的均匀持续有利于提高输送效率。对不同倾斜角度结果进行对比发现, 倾角越大, 固体粒子与管壁碰撞接触面越小, 速度越大, 输运速率升高, 同时粒子角速度减小。倾斜管道横向振动导致部分固体粒子悬浮流动, 固体粒子与管壁碰撞加剧, 动能损失大, 输运连续性差, 此外, 管壁附近粒子具有较大速度, 受横向流体力作用, 粒子在具有更大的径向速度。在纵向振动工况中, 更多粒子在管道中部流动, 管道中心粒子具有较大速度, 且输运速率比横向振动工况提升。

6.2 展望

本文使用 MPS-DEM 耦合方法对振动影响下管道两相流流场进行数值计算, 通过对流场分析和固体粒子输运规律总结, 取得了一些结果, 但仍存在许多不足, 主要有以下几方面:

(1) 首先在管道方面, 本文为方便计算, 将工程中的柔性立管简化为 4m 长度的刚性立管, 没有考虑管道位移在轴向上的不同引起的流场变化, 可以改变物理模型, 将管道设置为可变形的柔性材料进行进一步的分析。

(2) 考虑实际工程中矿物破碎情况。本文使用矿物颗粒均为球体, 且同一工况中粒子大小相同, 在实际情况下, 由于矿物破碎效果的不同, 矿物颗粒往往呈现为不规则形状, 大小也不相同, 在之后的研究工作中需要引入不同形状及体积的固体粒子, 使计算结果更具贴合工程实际。

(3) 考虑实际立管长度。本文使用立管模型长度为 4m, 实际立管长度可达几千米, 现已有应用于超长管道的计算方法, 在进一步研究中需要将其应用至振动管道场景。

(4) 考虑粒子输入立管形式不同。本文在布置好初始时刻粒子后进行计算, 但在实际工程中, 应考虑从管道外部输入固体粒子的情况, 包括不规则和间断的粒子团。



虽然在 5.1 节中对不同初始时刻布置形式的工况进行了计算分析，但未能很好模拟实际情况，在下一步研究中，应改善边界条件，设置管道之外的粒子进行输入计算。

(5) 考虑更复杂的振荡运动。本文将振荡运动简化为近似简谐振动的形式，且固定了振动方向，但在实际海洋环境中，振荡运动形式会随时间发生变化，包括振幅、周期、振动方向等，在进一步的研究里应完善更复杂的振荡运动模块。



参 考 文 献

- [1] Liu G J, Li H Y, Qiu Z Z. A mini review of recent progress on vortex-induced vibrations of marine risers[J]. Ocean Engineering, 2020, 195: 106704.
- [2] 刘少军, 刘畅, 戴瑜. 深海采矿装备研发的现状与进展[J]. 机械工程学报, 2014, 50(2): 8-18.
- [3] Liu G J, Li H Y. A mini review of recent progress on vortex-induced vibrations of marine risers[J]. Ocean Engineering, 2020, 195.
- [4] Vandiver J K, Marcollo H, Swithenbank S. High mode number vortex induced vibration field experiments[J]. Offshore Technology. 2005, 5: 1083–1089.
- [5] Srivilairit T, Manuel L. Vortex-induced vibration and coincident current velocity profiles for a deepwater drilling riser[J]. Journal of Offshore Mechanics. 2009, 131 (2): 1–11.
- [6] Chaplin. Laboratory measurements of vortex-induced vibrations of a vertical tension riser in a stepped current[J]. Journal of Fluids and Structures. 2005, 21:3–24.
- [7] Vandiver J K, Jaiswal V, Jhingran V. Insights on vortex-induced, traveling waves on long risers[J]. Journal of Fluids and Structures. 2009, 25: 641–653.
- [8] Song J, Lu L, Teng B. Laboratory tests of vortex-induced vibrations of a long flexible riser pipe subjected to uniform flow[J]. Ocean Engineering. 2011, 38: 1308–1322.
- [9] Morooka C K, Tsukada R I. Experiments with a steel catenary riser model in a towing tank[J]. Applied Ocean Research. 2013, 43: 244–255.
- [10] Capell N A, Carlson D W. Vortex-induced vibration of a single degree-of-freedom flexibly mounted horizontal cylinder near the free surface[J]. Journal of Sound and Vibration. 2019, 444: 161–175.
- [11] Trim A D, Braaten H. Experimental investigation of vortex-induced vibration of long marine risers[J]. Journal of Fluids and Structures. 2005, 21: 335–361.
- [12] Lie H, Kaasen K. Modal analysis of measurements from a large-scale VIV model test of a riser in linearly sheared flow[J]. Journal of Fluids and Structures. 2006, 22: 557–575.
- [13] Chen W L, Zhang Q. An experimental investigation on vortex induced vibration of a flexible inclined cable under a shear flow[J]. Journal of Fluids and Structures. 2015, 54: 297–311.
- [14] Thorsen M J, Sævik S. Non-linear time domain analysis of cross flow vortex-induced vibrations[J]. Marine Structures. 2017, 51: 134–151.



- [15] Bishop R E, Hassan A Y. The lift and drag forces on a circular cylinder oscillating in a flowing fluid. *Math[J]. Physical and Engineering Sciences in Medicine*.1964, 277: 51–75.
- [16] Hartlen R T, Curri G. Lift-oscillator model for vortex-induced vibrations[J]. *Journal of Engineering Mechanics*. 1970, 96 (5): 577–591.
- [17] Srinil N. Multi-mode interactions in vortex-induced vibrations of flexible curved/straight structures with geometric nonlinearities[J]. *Journal of Fluids and Structures*. 2010, 26: 1098–1122.
- [18] Srinil N. Analysis and prediction of vortex-induced vibrations of variable-tension vertical risers in linearly sheared currents[J]. *Applied Ocean Research*. 2011, 33: 41–53.
- [19] Thorsen M J, Sævik S. Fatigue damage from time domain simulation of combined in-line and crossflow vortex-induced vibrations[J]. *Marine Structures*. 2015, 41: 200–222.
- [20] Gao Y, Yang K, Zhang B. Numerical investigation on vortex-induced vibrations of four circular cylinders in a square configuration[J]. *Ocean Engineering*. 2019, 175: 223–240.
- [21] Wang K, Tang W. Time domain approach for coupled crossflow and in-line VIV induced fatigue damage of steel catenary riser at touchdown zone[J]. *Marine Structures*. 2015, 41: 267–287.
- [22] Xue H, Tang W, Qu X. Prediction and analysis of fatigue damage due to crossflow and in-line VIV for marine risers in non-uniform current[J]. *Ocean Engineering*. 2014, 83: 52–62.
- [23] Pang J, Zhu B, Zong Z. A numerical simulation model for the vortex induced vibration of flexible risers using dynamic stiffness matrices[J]. *Ocean Engineering*. 2019, 178: 306–320.
- [24] Lu Z, Fu S, Zhang M. An efficient time-domain prediction model for vortex-induced vibration of flexible risers under unsteady flows[J]. *Marine Structures*. 2019, 64: 492–519.
- [25] Yang W, Ai Z, Zhang X. Nonlinear three-dimensional dynamics of a marine viscoelastic riser subjected to uniform flow[J]. *Ocean Engineering*. 2018, 149: 38–52.
- [26] Bourguet R, Lucor D. Mono- and multi-frequency vortex-induced vibrations of a long-tensioned beam in shear flow[J]. *Journal of Fluids and Structures*. 2012, 32: 52–64.
- [27] Khan N B, Ibrahim Z, Nguyen L. Numerical investigation of the vortex-induced vibration of an elastically mounted circular cylinder at high Reynolds number ($Re \frac{1}{4} 104$) and low mass ratio using the RANS code[J]. *Plos One*. 2017, 12:132-146.
- [28] Wang E, Xiao Q. Numerical simulation of vortex-induced vibration of a vertical riser in uniform and linearly sheared currents[J]. *Ocean Engineering*. 2016, 121: 492–515.
- [29] Jung J H, Yoon H S. Large eddy simulation of flow over a twisted cylinder at a subcritical Reynolds number[J]. *Journal of Fluid Mechanics*. 2017, 759: 579–611.



- [30] Guo C, Guo H, Hu J. Large eddy simulation of flow over wavy cylinders with different twisted angles at a subcritical Reynolds number[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2019, 7 (7): 227.
- [31] Guo L, Zhang X, He G. Large-eddy simulation of circular cylinder flow at subcritical Reynolds number: turbulent wake and sound radiation[J]. *Acta Mechanica*. 2015, 32 (1): 1–11.
- [32] Fu B, Zou L, Wan D. Numerical study of vortex-induced vibrations of a flexible cylinder in an oscillatory flow[J]. *Journal of Fluids and Structures*. 2018, 77: 170–181.
- [33] Sun L, Zong Z, Dong J. Strip wise discrete vortex method for VIV analysis of flexible risers[J]. *Journal of Fluids and Structures*. 2012, 35: 21–49.
- [34] Lin K, Wang J. Numerical simulation of vortex-induced vibration of long flexible risers using a SDVM-FEM coupled method[J]. *Ocean Engineering*. 2019, 172: 468–486.
- [35] Wang E, Xiao Q. Three-dimensional numerical simulation of two-degree-of-freedom VIV of a circular cylinder with varying natural frequency ratios at $Re \leq 500$ [J]. *Journal of Fluids and Structures*. 2017, 73: 162–182.
- [36] Matin N H, Bi K, Hao H. Effectiveness of using pipe-in-pipe (PIP) concept to reduce vortex-induced vibrations (VIV): three-dimensional two-way FSI analysis[J]. *Ocean Engineering*. 2018, 148: 263–276.
- [37] Martins F A C, Avila J. Three-dimensional CFD analysis of damping effects on vortex-induced vibrations of 2DOF elastically mounted circular cylinders[J]. *Marine Structures*. 2019, 65: 12–31.
- [38] Wanderley J B V, Soares L F. Vortex-induced vibration on a two-dimensional circular cylinder with low Reynolds number and low mass-damping parameter[J]. *Ocean Engineering*. 2015, 97: 156–164.
- [39] Ding L, Zou Q, Zhang L. Research on flow-induced vibration and energy harvesting of three circular cylinders with roughness strips in tandem[J]. *Ocean Engineering*, 2018, 11 (11): 2977.
- [40] Thorsen M J, Sævik S, Larsen C M. Non-linear time domain analysis of crossflow vortex-induced vibrations[J]. *Marine Structures*, 2017, 51: 134–151.
- [41] Dai Y, et al. Dynamics analysis of deep-sea mining pipeline system considering both internal and external flow. *Marine Georesources & Geotechnology*, 2021, 39.
- [42] ang H L, Liu S J. Measuring method of solid-liquid two-phase flow in slurry pipeline for deep-sea mining[J]. *Journal of Marine Sciences*, 2018, 34: 459–469.
- [43] Zhu K, Madhusudana Rao S, Wang CH, Sundaresan S. Electrical capacitance tomography measurements on vertical and inclined pneumatic conveying of granular solids[J]. *Chemical Engineering Science*, 2003, 58:4225-4245.



- [44] Li J, Fu F, Li S, Xu C, Wang S. Velocity characterization of dense phase pneumatically conveyed solid particles in horizontal pipeline through an integrated electrostatic sensor[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2015, 76:198-211.
- [45] Maré T, Voicu I, Miriel J. Numerical and experimental visualization of reverse flow in an inclined isothermal tube[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2005, 30:9-15.
- [46] Yang J, Zhang Y, Wang CH, Liang YC. On the electrostatic equilibrium of granular flow in pneumatic conveying systems[J]. *AIChE Journal*, 2006, 52:3775-3793.
- [47] Murgan I, Bunea F, Ciocan GD. Experimental PIV and LIF characterization of a bubble column flow[J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2017, 54:224-235.
- [48] Tripathi NM, Santo N, Kalman H, Levy A. Experimental analysis of particle velocity and acceleration in vertical dilute phase pneumatic conveying[J]. *Powder Technology*, 2018, 330:239-251.
- [49] Yu D. Numerical and experimental investigations on pipeline internal solid-liquid mixed fluid for deep ocean mining[J]. *Ocean Engineering*, 2021, 220.
- [50] Matousek V. Pressure drops and flow patterns in sand-mixture pipes[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2022, 26: 693-702.
- [51] Gianandrea V M, Michael M. Numerical prediction of fully suspended slurry flow in horizontal pipes[J]. *Powder Technology*, 2014, 256: 61-70.
- [52] Gopaliya M K, Kaushal D R. Modeling of sand-water slurry flow through horizontal pipe using CFD [J]. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 2016, 64(3):261-272.
- [53] Kaushal D R, Thinglas T. CFD modeling for pipeline flow of fine particles at high concentration [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2012, 43:85-100.
- [54] Xu W J, Dong X Y. Simulation and verification of landslide tsunamis using a 3D SPH-DEM coupling method [J]. *Computers and Geotechnics*, 2021, 129: 103803.
- [55] Dabonneville. Development of a Multi-Approach and Multi-Scale Numerical Method Applied to Atomization[C]. Normandie University, 2018.
- [56] Ekambara K, Sanders R S. Hydrodynamic simulation of horizontal slurry pipeline flow using ANSYS-CFX[J]. *Ocean Engineering*, 2009, 48 (17): 8159–8171.
- [57] Kaushal D, Thinglas T. CFD modeling for pipeline flow of fine particles at high concentration[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2012, 43 (2012): 85–100.
- [58] Wang L, Qi Q, Tao M. Simulated pulsed flow of gas and particles in a horizontal oppose-pulsed gas jets of bubbling fluidized bed[J]. *Powder Technology*, 2018, 29 (12): 3507–3519.



- [59] Zhang S, Jiang B. Large eddy simulations of 45 inclined dense jets[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2016, 16 (1): 101–121.
- [60] Radhakrishnan A T, Lier J V. Rheological characterization of concentrated domestic slurry[J]. *Water Research*, 2018, 141: 35–250.
- [61] Ghoudi Z, Maazioui S, Benkhaldoun F. A new rheological model for phosphate slurry flows[J]. *Fluids* 2023, 8 (2): 57.
- [62] Zeineb G, Fayssal B, Federico P. Towards the modeling of the effect of turbulent water batches on the flow of slurries in horizontal pipes using CFD[J]. *European Journal of Mechanics / B Fluids*, 2023, 100: 203–222.
- [63] Zhang Y, Lu X, Zhang X. Numerical simulation on flow characteristics of large-scale submarine mudflow[J]. *Applied Ocean Research*, 2021, 108.
- [64] Guo X S, Zheng D F. Effect of different span heights on the pipeline impact forces induced by deep-sea landslides[J]. *Applied Ocean Research*, 2019, 87: 38–46.
- [65] Abbas Y B, Kazeminezhad M H, Amir, E S. Euler–Euler two-phase flow simulation of tunnel erosion beneath marine pipelines[J]. *Applied Ocean Research*, 2011, 33: 137–146.
- [66] Xiu Z X, Liu L J, Xie Q H. Runout prediction and dynamic characteristic analysis of a potential submarine landslide in Liwan 3-1 gas field[J]. *Applied Ocean Research*, 2015, 34: 116–122.
- [67] Yu M L, Lee C H. Multi-phase-flow modeling of underwater landslides on an inclined plane and consequently generated waves[J]. *Water Research*, 2019, 33: 103421.
- [68] Lee C H. Multi-phase flow modeling of submarine landslides: transformation from hyper concentrated flows into turbidity currents[J]. *Water Research*, 2019, 131: 103383.
- [69] Yu D, Zhang Y, Li X. Numerical and experimental investigations on pipeline internal solid-liquid mixed fluid for deep ocean mining[J]. *Ocean Engineering*, 2021, 220: 108411.
- [70] Chen Q, et al. Study of the hydraulic transport of non-spherical particles in a pipeline based on the CFD-DEM[J]. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 2021, 14 (1): 53–69.
- [71] Kloss C. Models algorithms and validation for opensource DEM and CFD-DEM[J]. *Progress in Computational Fluid Dynamics*, 2012, 12 (2–3): 140–152.
- [72] Blais B. CFD-DEM simulations of early turbulent solid-liquid mixing: prediction of suspension curve and just-suspended speed[J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2017, 123: 388–406.
- [73] Uzi A, Levy A. Flow characteristics of coarse particles in horizontal hydraulic conveying[J]. *Powder Technology*, 2018, 326: 302–321.



- [74] Li Y, Liu S. Research on rotating speed's influence on performance of Deep-Sea lifting motor pump based on DEM-CFD[J]. *Georgescu. Geotechnic*, 2019, 37 (8): 979–988.
- [75] Zhou M, Kuang S, Luo K. Modeling and analysis of flow regimes in hydraulic conveying of coarse particles[J]. *Powder Technology*, 2020, 373: 543–554.
- [76] Zhou M, Wang S. CFD-DEM modelling of hydraulic conveying of solid particles in a vertical pipe[J]. *Powder Technology*, 2019, 354: 893–905.
- [77] Liu L, Zhang X T. Numerical investigation on dynamic performance of vertical hydraulic transport in Deepsea mining[J]. *Applied Ocean Research*, 2023, 130: 103443.
- [78] Koshizuka S, Oka Y. Moving particle semi-implicit method for fragmentation of incompressible fluid[J]. *Nuclear Science and Engineering*, 1996, 123(3): 421-434.
- [79] Luo M, Khayyer A. Particle methods in ocean and coastal engineering[J]. *Applied Ocean Research*, 2021, 114: 102734.
- [80] Wen X, Zhao W, Wan D (2022) Multi-phase moving particle semi-implicit method for violent sloshing flows[J]. *European Journal of Mechanics B-fluids*, 2022, 95: 1-22.
- [81] Duan G, Yamaji A. A novel multiphase MPS algorithm for modeling crust formation by highly viscous fluid for simulating corium spreading[J]. *Nuclear Engineering and Design*. 2019, 343: 218–231.82.
- [82] Sakai M, Shigeto Y, Sun X. Lagrangian-Lagrangian modeling for a solid-liquid flow in a cylindrical tank[J]. *Chemical Engineering Journal*. 2012, 200-202: 663-672.
- [83] Li J, Qiu C, Tian L. Modeling 3D non-Newtonian solid-liquid flows with a free-surface using DEM-MPS[J]. *Engineering Analysis with Boundary Elements*. 2019, 105: 70-77.
- [84] Huang Y, Zhu C. Numerical analysis of tsunami–structure interaction using a modified MPS method[J]. *Natural Hazards*, 2015, 75 (3): 2847–2862.
- [85] Suzuki T, Hotta N. Development of modified particles method for simulations of debris flows based on constitutive equations and its application to deposition process Soc[J]. *Natural Hazards*, 2015, 68: 13–24.
- [86] Guo K, Chen R, Li Y. Numerical investigation of the fluid-solid mixture flow using the FOCUS code[J]. *Prog. Annals of Nuclear Energy*, 2017, 97: 197–213.
- [87] Liu Y, Chen L. Numerical investigation on the pressure loss of coarse particles hydraulic lifting in the riser with the lateral vibration[J]. *Powder Technology*, 2020, 367: 105-114.
- [88] Hailiang X, Wengang H, Yang F. Pressure loss of conveying pipeline of natural gas hydrate[J]. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 2019, 50 (2): 04–310.



- [89] Liu Y, Chen L, Influence of vortex induced vibration on the liquid-solid two-phase flow in pipeline[J]. Applied Ocean Research. 2017, 51 (4): 485–489.
- [90] Kaushal D R, Thinglas T. CFD modeling for pipeline flow of fine particles at high concentration[J]. International Journal of Multiphase Flow. 2012, 42: 85–100.
- [91] 刘勇, 石雯. 管道横向弯曲振动下液固两相流压强损失研究[J]. 水动力学研究与进展(A 辑), 2019, 34(01): 115-121.
- [92] 刘勇, 陈炉云. 涡激振动对管道液固两相流流场的影响[J]. 上海交通大学学报, 2017, 51(04): 485-489.
- [93] Xie F Z, Zhao W W, Wan D C. Numerical simulations of liquid-solid flows with free surface by coupling IMPS and DEM[J]. Applied Ocean Research, 2021, 114: 102771.
- [94] KOSHIZUKA S., NOBE A. Numerical analysis of breaking waves using the moving particle semi-implicit method[J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 1998, 26(7): 751-769.
- [95] Zhang Y X, Wan D C, Hino T. Comparative study of MPS method and level-set method for sloshing flows[J]. Journal of Hydrodynamics, 2014, 26(4): 577-585.
- [96] Khayyer A, Gotoh H. A 3D higher order Laplacian model for enhancement and stabilization of pressure calculation in 3D MPS-based simulations[J]. Applied Ocean Research, 2012, 37: 120–126.
- [97] Tanaka M, Masunaga T. Stabilization and smoothing of pressure in MPS method by quasi-compressibility[J]. Journal of Computational Physics. 2010, 229 (11): 4279–4290.
- [98] Marrone S, Colagrossi A. Fast free- surface detection and level-set function definition in SPH solvers[J]. Journal of Computational Physics, 2010, 229(10): 3652-3663.
- [99] E. Harada, H. Gotoh, H. Ikari, A. Khayyer, Numerical simulation for sediment transport using MPS-DEM coupling model. Advance in Water Resources (2017) S0309170817300428.
- [100] Alajbegovic A A. Phase distribution and turbulence structure for solid-fluid flow in a pipe[J]. International Journal of Multiphase Flow, 1994.



攻读学位期间学术论文和科研成果目录

- [1] 李仁祥, 赵伟文, 万德成. MPS-DEM 方法数值模拟超长管道固液混输流动[J]. 计算力学学报, 2023, (3): 395-402.
- [2] 李仁祥, 万德成. 基于 MPS-DEM 方法数值分析涡激振动影响下固体颗粒参数对立管混输流场影响[C]. 第八届全国船舶与海洋工程 CFD 会议, 中国, 哈尔滨, 2023.
- [3] Li R X, Xie F Z, Wan D C. Numerical investigation on the two-phase flow of hydraulic pipeline with lateral vibration based on MPS-DEM method[C]. 11th International Conference on Multiphase Flow, Japan, Kobe, 2023.
- [4] Li R X, Xie F Z, Wan D C. Numerical investigation on the characteristics of Two-phase flow field of inclined pipe with vibration based on MPS-DEM method[C]. International Conference on Computational Methods in Marine Engineering, Spanish, 2023.
- [5] 李仁祥, 潘宣景, 万德成. 基于 MPS-DEM 方法数值分析不同浓度下固体颗粒对水平管道混输的影响[C]. 第三十三届全国水动力学研讨会, 中国, 重庆, 2022.



致 谢

结束这个章节，也代表着我十多年来的求学旅程即将落下帷幕。回望来时路，有失意不得的困苦，有意志勃发的喜悦，但更多的是对陪伴我的老师，家人和同学的感谢。三年前我选择来到交大，选择流体力学作为自己的研究方向，选择 CMHL 大家庭作为我在交大新的“家庭”，现在我可以这样说，我无愧当时的选择。这三年来，遇到过很多挫折，在求学的艰难时刻，是家人和 CMHL 的各位同学老师给予了我鼓励支持，让我能够一直走下去。在科研学习遇到困难时，也是 CMHL 的各位老师师兄给我释惑答疑，我能走到硕士的这个阶段，少不了大家的关心和帮助。

首先，我要感谢万德成教授。从我的研究方向的选择，到课题的推进，到最后结题的工作，万老师一直耐心地给我指导建议。因为之前专业基础比较薄弱，在万老师推荐下系统学习了有关内容。在 CMHL 大家庭中学习，我深受万老师严谨的学术作风和高超的学术造诣的熏陶。科研方面，万老师为我指引了学术研究的方向，每次在组会上汇报，万老师都会针对阶段性的工作给我提出指导性的意见和建议，帮助我省了很多弯路。此外，万老师特别重视我们眼界的开阔，在这两年半的时间里，万老师带领我们参加了很多学术交流会议，“走出去”便能看的宽、看得远，这使我受益匪浅。在生活方面，我也深受万老师的关怀，不仅有每年两次的外出春游和秋游放松身心，在万老师的鼓励下我也开始积极进行身体锻炼，从以前不怎么运动变成现在隔几天就要进行跑步锻炼，我将永远记得万老师说的身体是本钱的教导。

感谢课题组王建华老师，赵伟文老师，曹留帅老师，庄园老师和朱政老师。感谢各位老师在我的科研生活遇到问题时的耐心指导，同时也感谢朱政老师在日常工作学习中为我们的付出。

感谢粒子法方向的谢丰泽师兄，潘宣景师兄和黄聪祎师姐。感谢谢师兄在求解器的应用和修改方面给予我的指导，我能在短时间了解软件的架构和使用的数值方法，并上手进行应用计算，少不了谢师兄的帮助和推荐。感谢潘师兄手把手教我怎样开展研究工作，从前处理，计算，到后处理都在潘师兄的帮助下学习。感谢 A706 实验室的各位师兄师姐在给我的关怀和帮助，感谢张文杰师兄总是忙前忙后帮助解决集群的问题。



感谢课题组与我一起入学的各位同学，感谢贺帆，王澳，吴萌萌，王魁，霍帅文，肖家伟，邵聿明，高港，我们一起学习了两年半的时间，感谢各位在学习和生活上给我的关心和帮助。

最后我要感谢我的父亲和母亲，从小到大你们总是给我充分的自由，无论升学还是就业，你们都充分考虑了我的意见。我很感恩能够有一个完整且充满爱意的童年，在人生的道路上，你们不给我过多的要求，让我自由、快乐地成长。现在，我想说，谢谢你们！

最后感谢交大给予我的平台，选择这里就选择了责任，以后我会继续带着属于我的那份责任走下去！



21002867

上海交通大学 学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名：李仁祥

日期：2024年1月22日

上海交通大学 学位论文使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。

本学位论文属于 ☒ 公开论文

☐ 内部论文，□1年/□2年/□3年 解密后适用本授权书。

☐ 秘密论文，____年（不超过10年）解密后适用本授权书。

☐ 机密论文，____年（不超过20年）解密后适用本授权书。

（请在以上方框内打“√”）

学位论文作者签名：李仁祥

日期：2024年1月22日

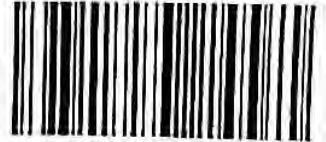
指导教师签名：王健

日期：2024年1月30日



21002867

上海交通大学硕士学位论文答辩决议书



121010910083

姓名	李仁祥	学号	121010910083	所在学科	船舶与海洋工程
指导教师	王建华	答辩日期	2024-01-22	答辩地点	木兰船建大楼A208
论文题目	基于MPS-DEM方法的振荡运动下海洋立管固-液混输流数值模拟研究				

投票表决结果：5/5/5（同意票数/实到委员数/应到委员数） 答辩结论：☒通过 ☐未通过
评语和决议：

混输问题是深海采矿重要的问题之一，论文针对振荡运动下海洋立管内部固-液混输流问题开展数值研究，论文选题正确，学术前沿性强，具有明确的理论意义和工程价值。

论文主要工作和创新如下：

（1）建立了适用于管道内部流场的MPS-DEM耦合方法数值计算模型，进行了数值验证，引入海洋流体力引起的管道振荡运动，研究分析了振荡运动对两相流流场的影响；

（2）开展了不同振动形态和不同粒子参数模拟研究，研究分析了振动周期、振幅、粒子直径和粒子浓度对流场粒子流态及压力损失等一系列关键参数的影响；

（3）开展了倾斜管道模拟研究，分别从倾斜角度、振动方向、初始固体粒子排布方式对立管性能提升的影响进行了分析。

论文研究内容丰富，技术路线正确，内容翔实，结果可信。论文结构完整，条理清晰，逻辑性强。论文撰写行文流畅，图表规范。论文已达到硕士学位论文的要求，是一篇优秀的硕士论文。论文工作表明，作者已掌握本学科坚实的基础理论和系统的专门知识，具有独立从事科研工作的能力。

论文作者在答辩中思路清晰，回答问题正确。经答辩委员会投票决议，全票（5票）同意通过论文答辩，并建议授予工学硕士学位。

2024 年 1 月 22 日

答辩委员会成员签名	职务	姓名	职称	单位	签名
	主席	邹早建	教授	上海交通大学	
	委员	陈伟民	研究员	上海船舶运输科学研究所	
	委员	王金宝	研究员	中国船舶集团第七〇八研究所	
	委员	张怀新	教授	上海交通大学	
	委员	朱仁传	教授	上海交通大学	
	秘书	庄园	助理研究员	上海交通大学	