

# 考虑流固耦合的 1 000 m 深海扬矿硬管动力学分析

李艳<sup>1,2</sup>, 廖科伏<sup>1</sup>, 卢飞<sup>1</sup>, 刘少军<sup>1,2</sup>

(1. 中南大学机电工程学院, 湖南长沙 410083; 2. 深海矿产资源开发利用技术国家重点实验室, 湖南长沙 410012)

**摘要:** 考虑 1 000 m 深海扬矿硬管外部海洋环境及管道内部流体的流动特性, 建立扬矿硬管内、外部流体的流固耦合有限元分析模型, 研究不同工况下, 内流、中间仓和拖航速度等对扬矿硬管位移特性及其应力分布特性的影响。研究结果表明内流是一个重要因素, 不能忽略其对管道的位移以及应力作用, 随着内流密度的增大, 管道横向偏移减小, 等效应力增大。在拖航状态下, 随着拖航速度的增大, 管道横向偏移以及等效应力都增大。管道横向偏移随着中间仓质量的增大而减小, 等效应力先减小后增大。

**关键词:** 深海采矿; 扬矿硬管; 流固耦合; 横向位移; 等效应力

中图分类号: TV312; TD807

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2017)01-0163-06

## Dynamic analysis of 1000 m deep – ocean lifting pipes considering fluid – structure interaction

LI Yan<sup>1,2</sup>, LIAO Kefu<sup>1</sup>, LU Fei<sup>1</sup>, LIU Shaojun<sup>1,2</sup>

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;

2. The State Key Laboratory of Exploitation and Utilization of Deep Sea Mineral Resources, Changsha 410012, China)

**Abstract:** Based on the flow characteristics of the external ocean environment and internal fluid for 1000 m deep-ocean lifting pipes, the fluid-structure interaction finite element model of the lifting pipes was established. Under the different working states, the displacement and stress distribution characteristics with different internal fluid, the buffer and the towing velocities were studied. The results indicated that, the internal fluid was an important factor, whose effects on the displacement and stress of pipes can not be neglected. With the increase of internal fluid density, the lateral displacement of the lifting pipes decreased and the equivalent stress increased. With the increase of towing velocity, both the lateral displacement and the equivalent stress of the lifting pipes increased. With the increase of the buffer weight, the lateral displacement of the lifting pipes decreased and the equivalent stress first decreased and then increased.

**Key words:** deep-ocean mining; lifting pipes; fluid-structure interaction; lateral displacement; equivalent stress

## 1 研究背景

随着深海资源开发的话题不断升温, 自 20 世纪 60 年代以来, 世界各主要大国都对深海资源的勘探、开发技术给予了极大的关注。我国于 1999 年正式获得了太平洋东部  $7.5 \times 10^4 \text{ km}^2$  的多金属结核矿区的专属勘探权和优先开采权。依照勘探合同要求, 深海采矿系统的设计研发是其中一个重要组成

部分。我国提出的深海采矿 1 000 m 中试系统由采矿船、扬矿硬管、提升泵、中间仓、软管、集矿机等组成<sup>[1]</sup>, 如图 1 所示。采矿系统处于海洋环境之中, 受到波浪、海流和采矿船的拖航等多因素的作用, 研究各种因素对扬矿硬管位移特性及其应力分布特性的影响对采矿系统的合理设计具有重要的意义。扬矿硬管上端与采矿船相连, 悬吊于采矿船上, 下端有中间矿仓并与软管相连。扬矿硬管在输送固液两相流

收稿日期: 2016-10-31; 修回日期: 2016-11-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(51104177); 国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(2012AA091201); 湖南省科技重大专项(2014FJ1002)

作者简介: 李艳(1975-), 女, 湖南永州人, 博士, 副教授, 主要从事机电液系统控制理论与技术、深海作业装备设计与控制。

体过程中,受到内外流体作用,管道与流体之间会出现流固耦合现象。Achouyab 等<sup>[2]</sup>将管道因流固耦合作用产生的振动简化为平面梁的纵向和横向振动,使用有限元法和 Newmark 算法计算了管道的位移;Bar - Avi<sup>[3]</sup>用解析法分析了等直径扬矿硬管在涡流作用下的横向振动;Kim 等<sup>[4]</sup>采用模态叠加法将扬矿硬管考虑成连续的受拉伸的梁。

国内部分学者亦对扬矿硬管运动特性做了诸多分析,其中包括徐妍等<sup>[5]</sup>利用有限元法将扬矿管线转化成弹性梁,建立管道纵向及横向振动数学模型,并对扬矿管线进行静力及动态分析,得到不同海况及工况下管道的偏移、弯曲应力及振动特性。周知进等<sup>[6]</sup>采用有限元方法对固液两相流体输送过程中的流固耦合作用进行了应力和位移计算,分析了内部流体和外部流体对管道的作用。唐达生等<sup>[7]</sup>探讨了锰结核泵工作对扬矿管道的振动影响,在实验室建立了扬矿管道振动试验系统,进行了扭转和弯曲振动分析,测试了管道振动特性。税朗泉等<sup>[8]</sup>研究了轴向周期外激励对含有脉动流体两端简支输流管道横向振动稳定性的影响。基于经典流固耦合方程,采用二阶 Galerkin 方法求解,用解的收敛性作为稳定判据求取了管道横向振动稳定性方程。杨章锋<sup>[9]</sup>对两端铰支状态的海底输油管道及其内部输运油料形成的流固耦合系统进行研究,并将输油硬管及内流的运动分别转化为三维弹性力学特性方程及 N - S 流动方程。运用 ADINA 有限元仿真软件,得到输油硬管的固有频率及管壁应力在不同输油硬管管径、内流速度及密度下的变化。

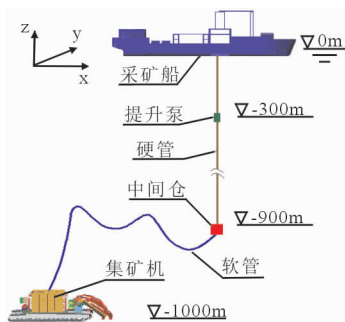


图1 中国深海采矿1000 m中试系统

以上学者在扬矿管道方面做了大量研究,但都没考虑在外部海流以及内部流体共同作用下的管道流固耦合特性。本文基于 Workbench 流固耦合模块,以中国深海采矿1000 m中试系统为工程背景,建立扬矿硬管流固耦合有限元模型,在内流和外流共同作用下对硬管进行流固耦合动力学仿真,研究

不同工况下,内流、中间仓和拖航速度等对扬矿硬管位移特性及其应力分布特性的影响,为深海采矿扬矿硬管的设计及优化提供参考。

## 2 扬矿硬管受力及流固耦合数学模型

扬矿硬管工作于海洋环境里,受力十分复杂,整个作用工作中扬矿硬管必然一直受到波流联合力  $F_{BH}$ <sup>[10]</sup>,采矿船拖行  $F_t$ ,顶端张力  $T_{TOP}$ ,自身的重力  $G_y$ ,内部流体重力  $G_L$ ,扬矿泵的重力  $G_B$ ,中间仓重力  $G_Z$ ,浮力  $F_f$  以及其他一些附件重力作用等。扬矿硬管受力边界条件包括其上端与采矿船相连接,随船运动、下端与中间仓相连接、中间仓与集矿机通过扬矿软管相连接。中间仓外形尺寸相对900 m扬矿硬管较小,只考虑其重量对扬矿硬管的影响,扬矿软管的刚度较小,且附着有浮力材料,对扬矿硬管的作用力可以忽略不计,可将扬矿硬管下端作为自由端来处理。扬矿硬管受力图如图2所示。

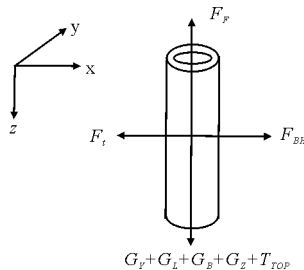


图2 深海采矿系统中扬矿硬管受力示意图

### 2.1 波流联合作用下的液动力

实际海上经常会遇到同时存在浪与流的情况。当波浪和水流共存时,波流力的计算需采用扩展形式的 Morison 方程<sup>[11]</sup>,它涉及两个问题,一是波浪质点速度与水流速如何叠加,二是水动力系数如何选择,这两者是相互关联的。由于海流的存在,必定会改变波浪原来的运动特性,从而影响管柱上的波浪力。波和流的联合作用极为复杂,不能对波和流各自作用的流体力简单地线性叠加,目前工程设计中,按下列公式近似计算。设波浪和海流的速度矢量分别为  $u_B$  和  $u_H$ ,设波浪传播方向为坐标系的  $x$  轴正向,且波与流同向,则可得波流联合作用下于深度  $z$  处  $dz$  长度管柱的流体动力载荷计算公式为:

$$dF = \frac{1}{2} \rho C_D D (u_B + u_H) |u_B + u_H| dz + \frac{\pi D^2}{4} \rho C_M \dot{u}_B dz \quad (1)$$

对于深海采矿系统来说,其扬矿管线在波流联合作用下还要随采矿船运动,假设扬矿管的水平运

动速度为  $u_v$ , 且与波流同向, 则其流体动力学载荷为:

$$dF = \frac{1}{2} \rho C_D D (u_B + u_H - u_v) | u_B + u_H - u_v | dz + \frac{\pi D^2}{4} \rho C_M (\dot{u}_B - \dot{u}_v) dz \quad (2)$$

式中:  $\rho$  为海水密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $C_D$  为拖曳力系数, 根据我国《海港水文》的规定选取  $C_D = 1.2$ ;  $D$  为扬矿硬管外径;  $C_M$  为惯性力系数, 根据横截面形状, 选取  $C_M = 2^{[12]}$ ;  $u_H$  为海流水质点的水平速度,  $\text{m}/\text{s}$ ;  $u_B$  为波浪水质点的水平速度,  $\text{m}/\text{s}$ ;  $\dot{u}_B$  为波浪水质点的水平加速度,  $\text{m}/\text{s}^2$ 。

海流速度在海洋垂直切面上沿海水深度是变化的, 在我国勘查的试采区, 洋面流速为  $0.772 \text{ m}/\text{s}$ , 海底流速为  $0.15 \text{ m}/\text{s}$ ; 根据文献[13]给出海深  $z$  处的洋流速度公式:

$$u_H = 0.15 + 0.622 \left( \frac{1000 - z}{1000} \right)^{12} \quad (3)$$

根据无限水深中性波理论<sup>[14]</sup>, 以及中国深海采矿 1 000 m 海试系统工作区域海况得到:

波浪运动速度:

$$u_B = 0.98125 e^{\frac{z}{1000}} \quad (4)$$

波浪运动加速度:

$$\dot{u}_B = 0.771 e^{\frac{z}{1000}} \quad (5)$$

联合公式(2)、(3)、(4)、(5)以及扬矿管的水平运动速度  $u_v$  便可求出距海面  $z \text{ m}$  处长度为  $dz$  的扬矿硬管所受波流力大小。

## 2.2 扬矿系统的重力和浮力

扬矿硬管自身重力:

$$G_Y = \frac{\pi}{4} \rho_Y g (D_o^2 - D_i^2) L \quad (6)$$

内部流体重力:

$$G_L = \frac{\pi}{4} \rho_L g D_i^2 L \quad (7)$$

海水浮力:

$$F_F = \frac{\pi}{4} \rho_H g D_o^2 L \quad (8)$$

式中:  $\rho_Y$ 、 $\rho_L$ 、 $\rho_H$  分别是扬矿硬管的密度、内部流体的密度以及海水的密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $D_o$ 、 $D_i$  分别为扬矿硬管的外径和内径,  $\text{m}$ ;  $L$  为扬矿硬管的总长度,  $\text{m}$ 。

## 2.3 流固耦合数学模型

扬矿管道在作业过程中, 与内部提升矿浆及外部海流发生流固耦合效应, 流体作用力施加到管壁(结构)上, 结构的变形又反过来影响流体区域, 对

深海采矿系统的整体联动性及开采效率产生较大影响。流体流动遵循如下质量守恒定律、动量守恒定律。

质量守恒方程:

$$\frac{\partial \rho_f}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f v) = 0 \quad (9)$$

动量守恒方程:

$$\frac{\partial \rho_f v}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f v v - \tau_f) = f_f \quad (10)$$

式中:  $t$  为时间,  $\text{s}$ ;  $f_f$  为体积力矢量,  $\text{N}$ ;  $\rho_f$  为流体密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $v$  为流体速度矢量,  $\text{m}/\text{s}$ ;  $\tau_f$  为剪切力张量,  $\text{N}$ , 可表示为:

$$\tau_f = (-p + \mu \nabla \cdot v) I + 2\mu e \quad (11)$$

式中:  $p$  为流体压力,  $\text{Pa}$ ;  $\mu$  为动力黏度,  $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ;  $e$  为速度应力张量,  $\text{Pa}$ :

$$e = \frac{1}{2} (\nabla v + \nabla v^T) \quad (12)$$

固体部分的守恒方程可以由牛顿第二定律导出:

$$\rho_s \ddot{d}_s = \nabla \cdot \sigma_s + f_s \quad (13)$$

式中:  $\rho_s$  为固体密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $\sigma_s$  为柯西应力张量,  $\text{Pa}$ ;  $f_s$  为体积力矢量,  $\text{N}$ ;  $\ddot{d}_s$  为固体域当地加速度矢量,  $\text{m}/\text{s}^2$ 。

在交界面处满足边界位移协调方程:

$$d_f = d_s \quad (14)$$

以及边界力平衡方程:

$$n_f \cdot \tau_f = n_s \cdot \tau_s \quad (15)$$

式中:  $d_f$  为流体位移,  $\text{m}$ ;  $d_s$  为结构位移,  $\text{m}$ ;  $\tau_f$  为流体的应力,  $\text{Pa}$ ;  $\tau_s$  为结构的应力,  $\text{Pa}$ 。

## 3 扬矿硬管流固耦合仿真模型

本文综合考虑管道外部海洋环境及管道内部流体的流动特性, 采用有限元仿真软件 ANSYS Workbench 建立扬矿硬管的内、外部流体的流固耦合力学有限元分析模型, 对扬矿硬管的流固耦合行为进行研究。分析在不同影响因素下扬矿管道的流固耦合力学行为。通过 Workbench 软件创建基于 ANSYS 与 CFX 的扬矿管线流固耦合分析模型。在 Geometry 模块中建立扬矿硬管和内、外部流体的三维实体模型, 模型如图 3 所示, 模型主要参数见表 1。

根据表 1 参数在 Transient Structural 模块中定义扬矿硬管的材料属性, 进行网格划分, 并定义约束及添加载荷。在 CFX 模块中定义内、外部矿浆流体

属性参数、进行网格划分,并设置流固耦合过程参数变量,选取扬矿管道壁面为流固耦合交界面,分析求解流程如图4所示。在进行流固耦合仿真计算时,通过改变内流参数、拖航速度以及中间仓等参数,分析在内、外流作用下扬矿管线的流固耦合力学行为。在CFX模块中定义内部流体提升速度为3 m/s,密度随不同提升浓度而改变。外部海流的运动速度参照公式(3)。

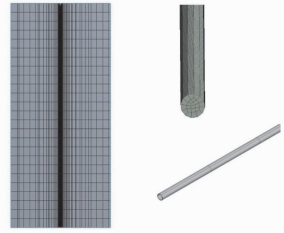


图3 考虑内外流的1000 m扬矿硬管流固耦合模型

表1 深海采矿1000 m扬矿硬管的主要参数<sup>[15]</sup>

参数	硬管 总长/m	外径/ mm	壁厚/ mm	材料	密度/ (kg·m <sup>-3</sup> )	弹性模 量/GPa	泊松比	中间仓 质量/t	结核 质量/t	提升泵 质量/t	作业海况		拖航速度/ (m·s <sup>-1</sup> )
											四级	六级	
取值	900	219.08	2.7	P110 钢	7850	210	0.3	5~500	7.2	6.08	浪高2.5m 周期8s	浪高4m 周期10s	0.2~0.6

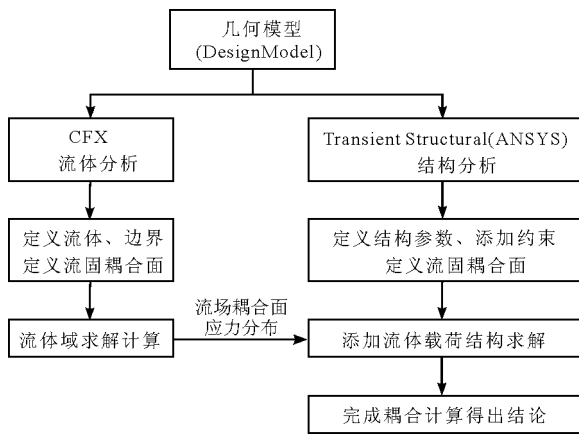


图4 流固耦合分析求解流程

## 4 横向位移分析

### 4.1 作业状态下扬矿硬管横向位移分析

采矿作业状态下,只有集矿机处于运动状态,扬矿硬管不受采矿船拖航所产生的拖曳力作用,考察不同海况、内流密度对硬管横向位移的影响。

4.1.1 不同海况的影响 内部流体密度为1 025 kg/m<sup>3</sup>,环境参数:在四、六级海况下,系统顶端的采

矿船所受的激励分别为  $L_h = 1.25\sin(0.25\pi t)$ 、 $L_h = 2\sin(0.2\pi t)$ <sup>[16]</sup>。在两种不同激励下,在Workbench中,对扬矿硬管进行动力学仿真,硬管空间构型如图5所示。由图5可知,在四级、六级海况下,扬矿硬管底端横向位移出现最大值,其中四级海况下最大横向位移为3.55 m,六级海况下的最大横向位移为3.67 m。

4.1.2 内流密度的影响 研究在四级作业状态下,内部流体密度对扬矿硬管流固耦合力学行为的作用,在CFX模块中分别设定内部流体密度为0(即不考虑内流)、1 000、1 200、1 500、2 000 kg/m<sup>3</sup>。扬矿硬管最大横向位移和内流密度的关系如图6所示。由图6可知,内流是作业状态下影响扬矿硬管横向位移的一个重要因素,考虑内流后扬矿硬管横向位移减小,其底端最大横向位移随着内流密度的增大而有所减小。

### 4.2 拖航状态下扬矿硬管横向位移分析

在拖航状态下,扬矿硬管受中间仓的质量以及拖航速度影响较大。

4.2.1 中间仓质量对扬矿管位移的影响 拖航速

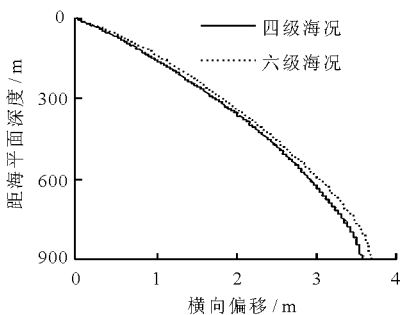


图5 硬管横向位移与四、六级作业海况的关系

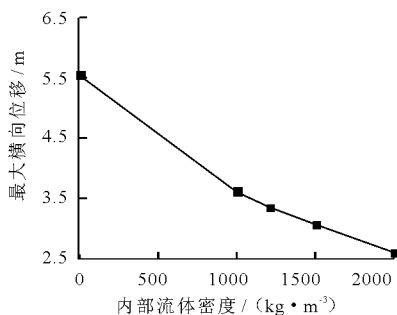


图6 硬管最大横向位移与内部流体密度的关系

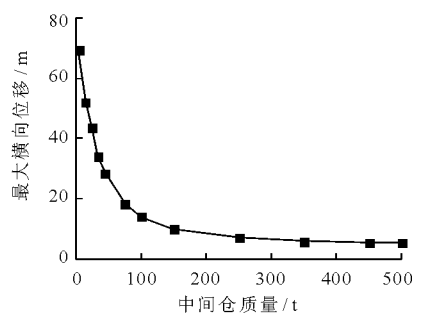


图7 硬管最大横向位移与中间仓质量的关系

度为 0.4 m/s,中间仓质量分别 5、15、25、35、45、75、100、150、250、350、450、500 t 时,底端最大横向位移与中间仓质量的变化如图 7 所示。从图 7 中可以看出,中间仓的质量对硬管横向位移有很大影响,中间仓质量越大,扬矿管横向位移越小,并呈现出非线性。当然,中间仓质量的增大,对扬矿管的强度影响是不利的,在采矿系统的设计过程中需要综合考虑各方面的因素。

4.2.2 拖航速度对扬矿硬管位移的影响 中间仓质量为 25 t,拖航速度分别为 0.2、0.3、0.4、0.5、0.6 m/s 时,扬矿硬管底端最大横向位移随拖航速度的变化规律如图 8 所示。从图 8 中可以看出,拖航速度越大,扬矿硬管的偏移位移越大,而且呈非线性关系。当拖航速度过大时,由于位移太大,采矿系统无法正常工作,因此应该控制拖航速度在一定范围内。

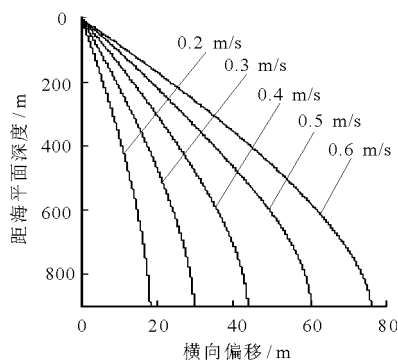


图 8 硬管空间位移构型与拖航速度的关系

## 5 应力分析

### 5.1 作业状态下扬矿硬管应力分析

5.1.1 不同海况的影响 在四级、六级海况下,扬矿硬管顶端的等效应力出现最大值,硬管顶端最大等效应力与四六级海况的关系如图 9 所示。从图 9

可知,其最大等效应力呈周期性变化,六级周期比四级偏大,两者周期都比所受激励大,这是因为扬矿硬管模型长达 1 000 m,采矿船的振动波形在扬矿管道中传输需要一定时间,因此其周期比激励周期大。

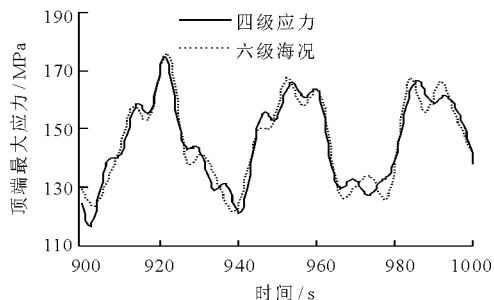


图 9 顶端最大应力与四、六级海况的关系

5.1.2 内流密度的影响 在作业状态下,硬管顶端最大等效应力和内流密度的关系如图 10 所示。由图 10 可知,内流是作业状态下影响扬矿硬管应力的一个重要因素,考虑内流后硬管最大等效应力增大,硬管顶端最大等效应力随着内流密度的增大而增大。

### 5.2 拖航状态下扬矿硬管应力分析

5.2.1 中间仓质量对扬矿硬管应力的影响 硬管顶端最大等效应力与中间仓质量的变化如图 11 所示。中间仓的质量对应力有很大影响,随着中间仓质量越大,扬矿硬管顶端等效应力先减小后增大,在中间仓质量较小时,拖航状态下产生的拖拽力起主要因素,此时,增加中间仓的质量能有效减少拖拽力的作用,从而起到减少等效应力的作用。但随着中间仓的质量进一步增大,此时中间仓的质量起主要因素,随着质量的增加,顶端最大等效应力也增加。

5.2.2 拖航速度对扬矿硬管应力的影响 在拖航过程中,拖航速度对硬管应力影响较大。扬矿硬管顶端最大等效应力随拖航速度的变化规律如图 12 所示。

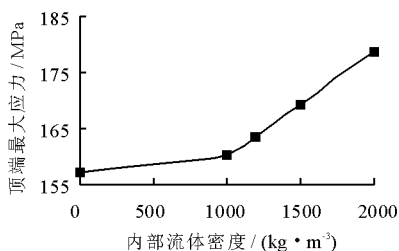


图 10 顶端最大等效应力与内部流体密度的关系

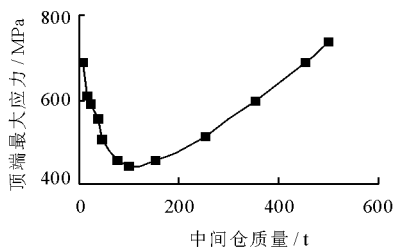


图 11 顶端最大等效应力与中间仓质量的关系

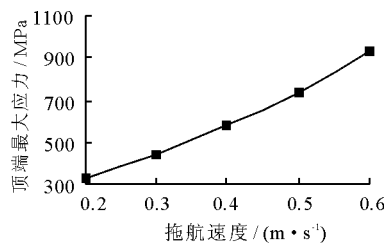


图 12 顶端最大等效应力与拖航速度的关系

从图 12 可以看出,拖航速度越大,扬矿管的顶端等效应力越大,而且呈非线性关系。

当拖航速度过大时,由于应力太大,采矿系统无法正常工作,应该控制拖航速度在一定范围内不能过大。

## 6 结 论

通过建模与计算,对于文中指定的深海采矿扬矿硬管模型,可得如下结论。

(1)位移响应。在作业状态下,内流是一个重要因素。拖航状态下管道水平偏移与作业状态下相比有明显的增大,并且随着拖航速度的增大而快速增大;在拖航速度较高时,管道末端水平偏移达到了很大的数值,必须重视其对海底集矿系统的影响,应合理设计集矿车在拖航阶段的跟随运动。

(2)应力响应。扬矿硬管顶端存在较大的应力极值,在作业状态下,六级海况应力比四级大,同时随着内流密度的增大而增大。在拖航状态下,顶端最大应力随着拖航速度的增大而增大、随着中间仓的质量先减小后增大,因此在一定拖航状态下,适当增加中间仓质量能有效减少最大应力值。

本文利用 Workbench 软件的流固耦合模块进行有限元模拟,对扬矿硬管在作业状态以及拖航状态下的水平偏移与应力的变化情况进行了较系统的分析,并得到一些结论,研究方法和结论可为扬矿系统的设计、深海采矿工作的开展以及相关研究提供参考。

### 参考文献:

- [1] “十五”采矿海试系统总师组. 大洋多金属结核中试采矿系统 1000m 海上试验总体系统技术设计[R]. 北京: 中国大洋协会, 2004.
- [2] Achouyab E H, Bahrar B. Numerical modeling of phenomena of water hammer using a model of fluid - structure interaction[J]. Comptes Rendus Mecanique, 2011, 339(4): 262 - 269.
- [3] Bar - Avi P. Dynamic responses of risers conveying fluid [J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 2000, 122(3): 188 - 193.
- [4] Kim K H, Hang S C, Seong W J, et al. Dynamic positioning control for the buffer of a deep-sea mining system using FIR

filter[C] // . Proceeding of the Eleventh International Offshore and Polar Engineering Conference. Stavanger, Norway, 2001: 17 - 22.

- [5] 徐妍, 张文明, 冯雅丽. 多段铰接式扬矿硬管系统建模与动力学分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2008, 39(3): 560 - 565.
- [6] 周知进, 阳宁, 王钊, 等. 外部流体作用下管道输送流固耦合效应偏移分析[J]. 振动与冲击, 2013, 32(13): 142 - 146.
- [7] 唐达生, 李钟, 周知进, 等. 锰结核泵工作对扬矿管道振动影响的研究[J]. 振动与冲击, 2015, 34(23): 149 - 152.
- [8] 税朗泉, 刘永寿, 顾致平, 等. 轴向周期激励下含脉动流体简支管道横向振动稳定性分析[J]. 振动与冲击, 2012, 31(7): 133 - 136.
- [9] 杨章锋. 内流对海底悬跨管线管壁应力影响的数值研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2008.
- [10] 张伟, 覃振东. 环境荷载参数对钢悬链线立管动力响应的影响[J]. 水资源与水工程学报, 2014, 25(3): 99 - 105.
- [11] 肖林京, 曾庆良, 张文明. 深海采矿扬矿管非线性偏移特性研究[J]. 机械工程学报, 2002, 38(8): 94 - 99.
- [12] 王树青. 海洋工程波浪力学[M]. 北京: 中国海洋大学出版社, 2013.
- [13] Asok, Kan K, Doki H. Experiment for optimum buffer damping in reducing longitudinal vibration of a long pipe string[J]. International Journal of Offshore and Polar Engineering, 1997, 7(2): 104 - 110.
- [14] Ni Q, Zhang Z L, Wang L. Application of the differential transformation method to vibration analysis of pipes conveying fluid [J]. Applied Mathematics and Computation, 2011, 217(16): 7028 - 7038.
- [15] 李艳. 基于三维离散元管线模型的深海采矿 1000m 海试系统整体联动产动力学研究[D]. 长沙: 中南大学, 2008.
- [16] 王刚, 刘少军, 李力. 1 000 m 深海采矿系统三维整体联动产动力学分析[J]. 金属矿山, 2005(2): 19 - 21.