

# 海底集矿机和移动输送站最小安全距离研究

魏明珠<sup>1,2</sup>, 邰艳荣<sup>1</sup>, 王旭<sup>1</sup>, 周济福<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院力学研究所 流固耦合系统力学重点实验室, 北京 100190;  
2. 中国科学院大学 工程科学学院, 北京 100049)

**摘要:** 海洋矿产资源的开发正由浅海向深海发展, 水下输送管道作为深海采矿系统中的必备构件, 其作业安全尤为重要. 本文以 6 000 m 深海采矿工程为背景, 研究了海底集矿机、海底移动输送站及连接两者的矿料输送管道的运动协调关系. 首先, 用悬链线理论得到输送管道的初始构形, 基于有限元方法, 构建了集矿机-输送管道-移动输送站系统三维动态响应模型, 进而讨论了集矿机和移动输送站运动过程中, 输送管道形态和应力的变化. 结果表明, 集矿机与移动输送站靠近时, 输送管道的最大应力增长速度变快, 威胁采矿系统的作业安全. 基于此, 提出了集矿机与移动输送站最小安全距离的概念, 分析并给出了管道壁厚和材料屈服应力对最小安全距离的影响规律.

**关键词:** 深海采矿; 集矿机; 移动输送站; 安全距离

中图分类号: P751

文献标志码: A 文章编号: 0254-0053(2020)04-0674-10

## Numerical Analysis of the Minimum Safe Distance between Deep-Sea Mining Vehicle and Movable Storage

WEI Mingzhu<sup>1,2</sup>, KUAI Yanrong<sup>1</sup>, WANG Xu<sup>1</sup>, ZHOU Jifu<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory for Mechanics in Fluid Solid Coupling Systems, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;  
2. School of Engineering Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The exploitation of marine mineral is developing from shallow to deep sea. The conveying pipe is an essential component of a deep sea mining system and its safety is of crucial importance for the system operation. Taking the 6000m deep mining system as an example, this paper mainly studies the coordination of the motions of the vehicle and the movable storage. Firstly, a 3D dynamic model is constructed based on finite element method to simulate the hydrodynamic response of the subsystem consisted of the mining vehicle, the conveying pipeline, and the movable storage. And the initial configuration of the conveying pipe is obtained by the catenary theory. Then, the relations between the configuration of the conveying pipe and the stress is discussed considering the operation of the mining vehicle and the movable storage. The simulation results show that the maximum Mises stress of the pile increases rapidly when the mining vehicle is close to the movable storage, which threatens the safety of the mining system. Based on this analysis, the minimum safe distance between the mining vehicle and the movable storage is conceived. And the influences of the yield stress and wall thickness of the pipe on the minimum safe distance is addressed.

**Key words:** deep sea mining; mining vehicle; movable storage; minimum safe distance

收稿日期: 2020-06-05

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2017YFC1404200); 国家自然科学基金(11572332);  
中国科学院战略性先导科技专项 A 类(XDA22040304)

作者简介: 魏明珠, 硕士生. 研究方向: 海洋工程. Email: weimingzhu@imech.ac.cn

通信作者: 周济福, 研究员, 博士. 研究方向: 海洋工程. Email: zhoujf@imech.ac.cn

随着社会经济的快速发展, 陆上资源日益短缺, 越来越难以满足人类发展的需求, 人们把资源开发的重点逐渐转向海底矿藏, 并由近海浅水区逐渐向远海深水区发展. 海洋矿产开采系统中水下矿料输送管道是其必备构件, 其受力与变形是影响采矿系统安全运行的关键要素. 因此, 对输送管道的运动学和动力学性能的分析在深海采矿技术中至关重要.

目前, 已有不少针对 1 000 m 水深采矿系统的研究, 该系统由采矿船、输送硬管、中间仓、输送软管和集矿机组成. 郭小刚等<sup>[1-2]</sup>、王刚等<sup>[3]</sup>对复杂海洋环境下的输送管道形态进行了分析. Wang 等<sup>[4]</sup>建立了拖曳水槽试验模型, 并利用有限元建模和动态仿真, 研究了输送管道运动形态. 符瑜等<sup>[5-6]</sup>利用理论分析和物理模型实验相结合的方法, 研究了输送管道的空间形态对集矿机受力的影响, 讨论了输送管道安全运行的条件. 徐海良和何清华<sup>[7]</sup>、郭浚良<sup>[8]</sup>等对内外流共同作用下的输送管道系统进行了力学分析. 王志等<sup>[9-10]</sup>、Oh 等<sup>[11]</sup>、李艳等<sup>[12]</sup>对不同条件下输送管道的侧向位移和最大主应力进行了研究. 肖林京等<sup>[13-14]</sup>研究了采矿船的拖航速度和中间仓质量对输送管道偏移的影响. 王志等<sup>[10]</sup>、韩庆珏等<sup>[15]</sup>等重点分析了集矿机的移动路径对整个采矿系统的影响, 给出了合适的工作行程路线和移动速度. 徐海良和何清华<sup>[16]</sup>推导出了在海浪和海水作用下管道运动的阻力公式. Wang 等<sup>[17]</sup>重点研究了输送管道在运输过程中的阻力损失. 另外, 王刚<sup>[18]</sup>和韩庆珏<sup>[15]</sup>基于海试系统整体联动作业方式, 从输送管线系统的空间构形出发, 给出了中间仓和集矿机的安全域. 这些研究工作大多集中在输送管道变形与受力以及集矿机路径规划等方面, 较少研究系统中各工作单元的运动协调及其对相应连接管道的影响.

本文研究 6 000 m 水深的深海采矿系统 (如图 1 所示)<sup>[19]</sup>, 它由水面采矿船、自航浮体、移动输送站、集矿机及输送管道组成. 与 1 000 m 水深采矿系统相比, 增加了移动输送站, 它与集矿机均为坐床设备, 工作过程中两者均处于运动状态. 1 000 m 水深采矿系统中, 中间仓位于集矿机的斜上方, 且不运动, 系统设计本身和工作方式均较简单. 而对于 6 000 m 水深采矿系统, 当集矿机与输送站在海床上行走至最大距离时, 两者之间的输送管道仍需保持拱形空间形态; 当两者行走至最小距离时, 管道中可能会发生应力集中而导致管道破坏. 因此, 本文提出最小安全距离的概念, 当集矿机与移动输送站的距离小于此值时, 输送管道可能发生屈服破坏. 不同于王刚<sup>[18]</sup>和韩庆珏<sup>[15]</sup>给出的安全域概念, 这里的“最小安全距离”是基于集矿机与输送站的运动协调性, 聚焦于输送管道的结构稳定与安全, 而并不仅仅是关注其空间构形.

鉴于此, 本文对海底集矿机和移动输送站之间的输送管道在自身重力、浮力、海流、运动边界共同作用下的空间形态和应力状态进行分析, 提出最小安全距离的概念, 给出了输送管道壁厚和材料屈服应力对该最小安全距离的影响规律.

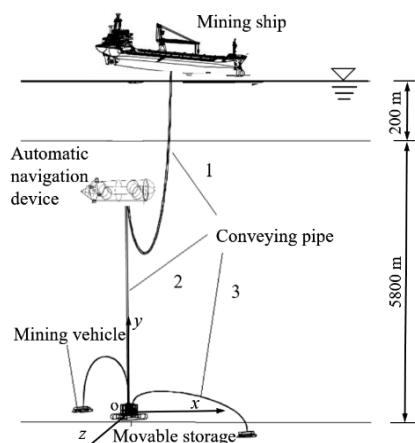


图 1 6 000 m 水深采矿系统示意图

Fig.1 Schematic of 6 000 m deep mining system

# 1 数值模型

## 1.1 控制方程

本文采用的结构运动方程为

$$[M][\ddot{X}] + [C][\dot{X}] + [K][X] = [F] \quad (1)$$

式中,  $[M]$ 为质量矩阵;  $[C]$ 为阻尼矩阵;  $[K]$ 为刚度矩阵;  $[F]$ 为外载荷;  $[X]$ 为结构位移;  $[\dot{X}]$ 为结构运动速度;  $[\ddot{X}]$ 为结构运动加速度. 采用隐式的 Newmark 法来求解式(1), 具体方法如下:

已知  $t$  时刻的位移  $[X]_t$ 、速度  $[\dot{X}]_t$  和加速度  $[\ddot{X}]_t$ , 求  $t + \Delta t$  时刻的位移  $[X]_{t+\Delta t}$ 、速度  $[\dot{X}]_{t+\Delta t}$  和加速度  $[\ddot{X}]_{t+\Delta t}$ . Newmark 方法假定在时间间隔  $[t, t + \Delta t]$  内, 加速度线性变化, 采用如下的位移和速度

$$[X]_{t+\Delta t} = [X]_t + (\Delta t)[\dot{X}]_t + (\Delta t)^2 \left[ \left( \frac{1}{2} - \lambda \right) [\ddot{X}]_t + \lambda [\ddot{X}]_{t+\Delta t} \right] \quad (2)$$

$$[\dot{X}]_{t+\Delta t} = [\dot{X}]_t + (\Delta t) \left[ (1 - \chi) [\ddot{X}]_t + \chi [\ddot{X}]_{t+\Delta t} \right] \quad (3)$$

将式(2)和(3)代入式(1), 可以得到  $t + \Delta t$  时刻的运动方程

$$[M][\ddot{X}]_{t+\Delta t} + [C] \left\{ [\dot{X}]_t + (\Delta t) \left[ (1 - \chi) [\ddot{X}]_t + \chi [\ddot{X}]_{t+\Delta t} \right] \right\} + [K] \left[ [X]_t + (\Delta t)[\dot{X}]_t + (\Delta t)^2 \left[ \left( \frac{1}{2} - \lambda \right) [\ddot{X}]_t + \lambda [\ddot{X}]_{t+\Delta t} \right] \right] = [F]_{t+\Delta t} \quad (4)$$

整理可以得到

$$[\hat{K}][X]_{t+\Delta t} = [\hat{F}]_{t+\Delta t} \quad (5)$$

其中

$$[\hat{K}] = \lambda (\Delta t)^2 [K] + \chi \Delta t [C] + [M] \quad (6)$$

$$[\hat{F}]_{t+\Delta t} = [F]_{t+\Delta t} - [K] \left\{ [X]_t + (\Delta t)[\dot{X}]_t + (\Delta t)^2 \left( \frac{1}{2} - \lambda \right) [\ddot{X}]_t \right\} - [C] \left\{ [\dot{X}]_t + (\Delta t)(1 - \chi) [\ddot{X}]_t \right\} \quad (7)$$

给定外载荷, 通过迭代求解可以得到结构的位移, 再结合几何方程与物理方程可以得到结构的应力和应变.

输送管道所受载荷包括自身重力、浮力以及海流作用力. 在深海采矿系统中, 输送管道抗弯刚度小, 因此, 其空间形态在集矿机和输送站的运动过程中变化较大. 为了保证集矿机在海底按照预定轨迹行驶, 减小管道对集矿机的牵制作用, 同时使管道的空间构型更加合理, 本文通过在管道上吊挂浮力体的方式增加其所受浮力, 使其悬浮在水中, 浮力体采用均匀分布方式, 如图2所示.

考虑线性剪切流场, 海面流速为 1.7 m/s, 海底流速为 0.15 m/s, 则海流速度剖面为

$$u = 0.15 + 1.55 \times \frac{y}{6000} \quad (8)$$

其中,  $u$  为流速,  $y$  为垂向坐标数值 (单位为 m), 海底处  $y=0$ , 海面处  $y=6000$ .

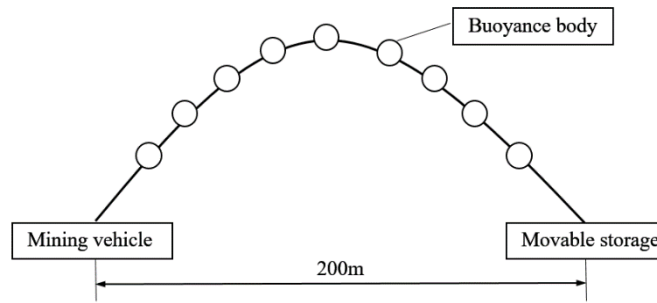


图2 均匀分布浮力体布置示意图

Fig.2 Layout of uniformly distributed buoyancy body

采用 Morison 公式计算流体载荷  $F$ , 考虑到结构运动的影响, 则单位长度结构所受海流载荷为

$$F = C_D \rho_w \frac{D}{2} \left( u - \frac{\partial x}{\partial t} \right) \left| u - \frac{\partial x}{\partial t} \right| + C_A \rho_w \frac{\pi D^2}{4} \left( \frac{\partial u}{\partial t} - \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} \right) + \rho_w \frac{\pi D^2}{4} \frac{\partial u}{\partial t} \quad (9)$$

式中,  $\rho_w$  为海水密度;  $D$  为结构横截面直径;  $u$  为垂直于结构的海流流速;  $C_D$  和  $C_M$  分别为拖曳力系数和惯性力系数;  $C_A$  为附加质量力系数, 满足  $C_M = C_A + 1$ ;  $\partial x / \partial t$  和  $\partial^2 x / \partial t^2$  分别为结构的运动速度和加速度.

### 1.2 边界条件

连接海底集矿机和移动输送站的输送管道具有大位移、大转动等明显的几何非线性特征, 模型中集矿机和输送站与输送管道的连接设为铰接<sup>[1,9-10]</sup>. 海底输送站以 0.1 m/s 的速度沿  $Z$  轴方向直线移动, 集矿机以 1 m/s 的速度按 S 形路线逐步向前推进, 一个周期的运动轨迹如图 3 所示. 集矿机最大采集宽度为 250 m, 转弯半径为 6 m. 图 3 表明输送站和集矿机之间的距离可能较小, 从而导致连接两者的输送管道出现材料破坏和结构失稳.

### 1.3 输送管道初始构形

输送管道在海水中受重力和浮力的作用处于静止状态时, 其初始形态为悬链线, 可采用悬链线理论描述. 悬链线总长 400 m, 两端点纵坐标相同, 横坐标差值为 200 m, 最终得到输送管道的初始形态如图 4 所示 (浮力大于重力).

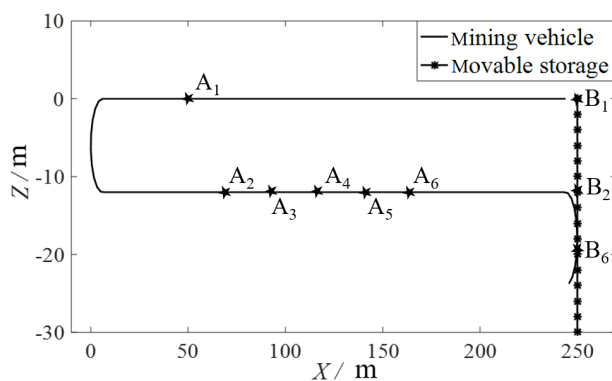


图3 集矿机(实线)与输送站(点划线)运动轨迹图

Fig.3 Trajectory of mining vehicle (solid line) and movable storage

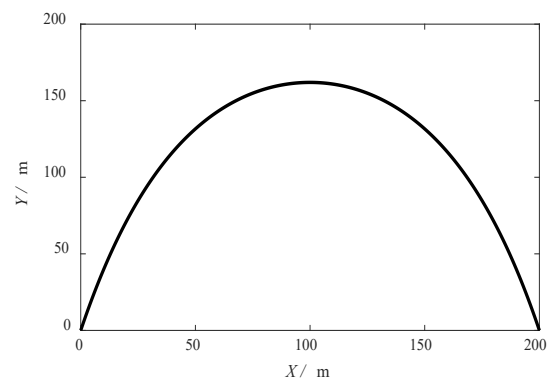


图4 悬链线管道初始形态示意图

Fig.4 Initial configuration of catenary pipeline

### 1.4 模型验证

采用“波流作用下海洋钻井隔水导管的动力响应”的标准案例<sup>[20]</sup>进行验证, 计算模型如图 5 所示, 以立管底部作为坐标原点建立  $Oxy$  坐标系,  $Ox$  轴正向与来流和波浪传播方向一致,  $Oy$  轴垂直向上.

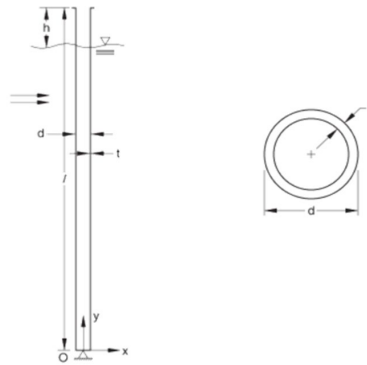


图5 顶张力立管受波、流作用示意图

Fig.5 Initial configuration of riser under current and surface wave

标准案例中,海洋钻井隔水导管受到线性波、剪切流作用,顶部作周期性运动.管道顶点受到 2.224 MN 的张力,并随时间按照正弦函数  $13.716+0.61\sin(2\pi t/9)$  运动;海流速度剖面为线性剖面,海面流速为 0.257 m/s,底部流速为 0 m/s;波幅  $A=3.048$  m,周期  $T=9$  s,波长  $L=126.53$  m.隔水导管参数与水动力系数如表 1 所示.

表 1 立管参数与水动力系数

Tab.1 Parameters of riser and hydrodynamic coefficients

Parameters	Value
Young's modulus $E$ / GPa	206.8
Shear modulus $G$ / GPa	103.4
Density $\rho_s$ / $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	7 900
Outside diameter $D$ / m	0.405
Wall thickness $t$ / m	0.0158
Effective diameter $d_e$ / m	0.66
Pipe length $L$ / m	463.3
The height of pipe above water $h$ / m	15.2
Pipe weight per unit length $w$ / $\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$	2 575
fluid density $\rho$ / $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	1 021
Drag coefficient $C_D$	0.7

表 2 给出了本文计算的隔水管上下顶点处的倾斜角度,同时列出了标准算例和美国石油学会(API)公告所发布的结果.由表 2 可知,本文的计算结果与其余两者相比差别很小,上顶点处倾角的相对误差分别为 2.50%、0%,下顶点处倾角的相对误差分别为 2.75%、1.20%.此外,隔水管在波流和顶部正弦运动的作用下,整个运动过程的水平位移包络线如图 6 所示.结果表明,本文模型计算结果与标准算例的结果吻合很好,证明了本文模型的合理性和准确性.

表 2 立管上下顶点处的倾斜角度

Tab.2 Angle of top and bottom vertices with the vertical

Model	Standard example	API	Model result
Top Angle	1.17°	1.20°	1.20°
Bottom Angle	2.48°	2.55°	2.51°

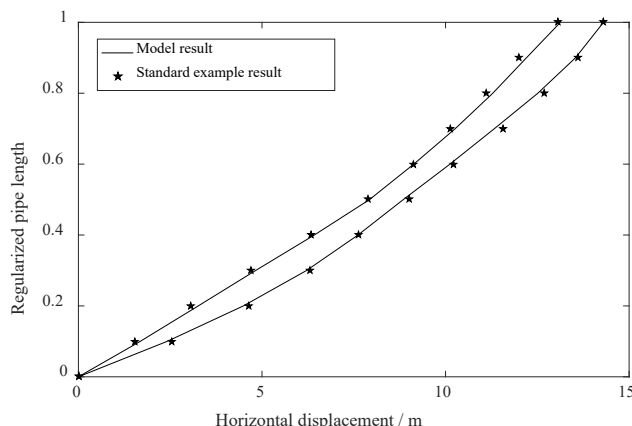


图 6 动力学过程中管道水平位移包络线

Fig. 6 Horizontal displacement envelope during the dynamic excitation

## 2 数值分析

### 2.1 集矿机与输送站的最小安全距离

以 6 000 m 水深海底采矿工程为背景, 建立海底集矿机和输送站之间输送管道的三维有限元模型. 单元类型选用三维二阶梁单元, 采用六面体结构网格. 管线材质的参数和水动力系数取值见表 3.

表 3 管道材料属性及水动力参数

Tab.3 Pipeline parameters and hydrodynamic parameters

Parameters	Value
Young's modulus $E$ / GPa	210
Shear modulus $G$ / GPa	81
Yield stress $\sigma_s$ / GPa	0.89
Pipe Density $\rho$ / $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	7 850
Outside diameter $D$ / m	0.3232
Wall thickness $t$ / m	0.06
Pipe length $L$ / m	400
Fluid Density $\rho$ / $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	1 052
Depth of water / m	6 000
current velocity/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	0.15~1.7
Drag coefficient $C_D$	1.2
Inertia coefficient $C_M$	2.0

根据集矿机与输送站之间的相对位置不同, 选取 6 种不同距离, 研究在运动过程中输送管道的最大等效应力的变化. 如图 3 所示,  $A_i$  和  $B_i$  分别对应集矿机和输送站的位置( $i=1,2\dots6$ ).

结果表明, 集矿机和输送站在运动过程中, 输送管道的最大等效应力均位于管道顶部. 分别提取上述 6 种条件下输送管道的最大等效应力, 得到最大等效应力随集矿机和输送站之间的距离  $AB$  的变化规律, 如图 7 所示. 可以发现, 集矿机在靠近输送站的过程中, 输送管道的最大等效应力迅速增加, 故当两者之间的距离减小到一定值后, 管道最大等效应力可能会超过材料的屈服应力, 致使材料发生破坏. 因此, 为保障采矿作业安全进行, 获得集矿机和输送站之间的最小距离很有必要.

为了获得集矿机与输送站两者运动轨迹对结构安全影响的一般规律, 本文建立管道有限元静力学分析模型, 选择以两者之间的距离作为研究切入点, 通过改变集矿机 (A 点) 与输送站 (B 点) 之间的直线距离  $AB$ , 分析得到管道的最大等效应力, 并采用第四强度理论进行校核. 将管道的最大等效应力等于

材料屈服应力时对应的距离  $AB$  定义为最小安全距离. 若管道的最大等效应力大于材料屈服应力, 则材料发生破坏, 即当集矿机与输送站之间的距离小于最小安全距离时, 管道材料发生破坏, 管道结构失稳.

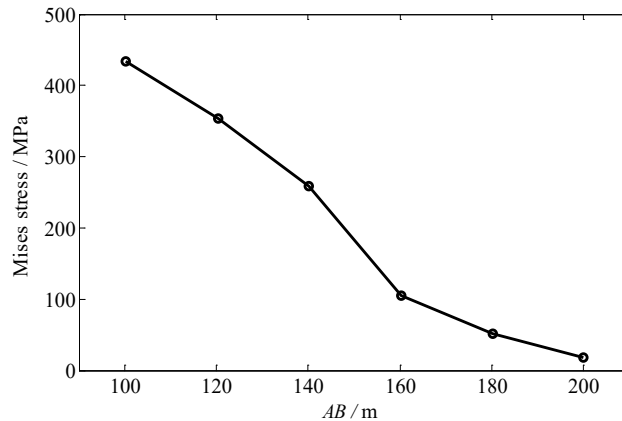


图7 应力最大值随直线距离( $AB$ )变化

Fig.7 The maximum stress varies with straight-line distance( $AB$ )

集矿机在靠近输送站的过程中, 其管道形态历时变化如图 8 所示. 由图可见, 当两者靠近时, 管道的弯曲变形很大, 顶部弧度变小, 底部弧度变大, 这种形态不仅使管道顶部出现应力集中, 可能导致管道结构发生破坏, 更会影响到管道内部矿石输送效率. 因此, 两者之间的最小安全距离对深海采矿系统的设计、运营和安全有重要意义.

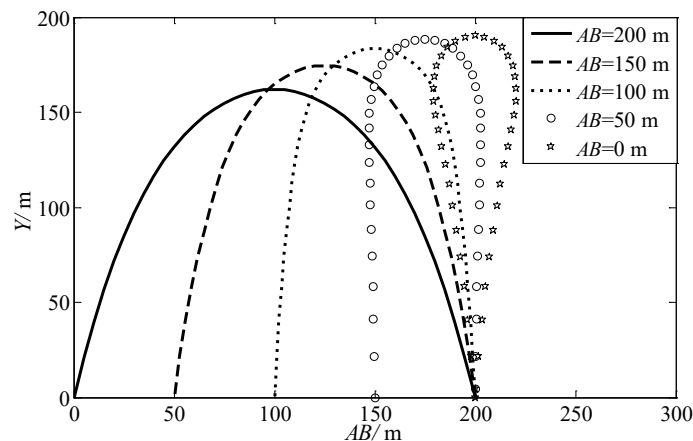


图8 管道形态变化图

Fig.8 Pipeline shape change diagram

## 2.2 最小安全距离的影响因素

通过以上分析可知, 当管道长度确定后, 最小安全距离与管道的抗弯刚度、抗拉刚度和材料的屈服应力有关, 而抗弯刚度和抗拉刚度与管道截面尺寸密切相关. 以下将通过改变管道壁厚和材料的屈服应力, 研究在集矿机运动过程中输送管道最大等效应力的变化, 从而获得相应的最小安全距离.

### 2.2.1 管道壁厚对最小安全距离的影响

设管道材料和内径不变, 通过改变管道外径尺寸, 分析管道壁厚的变化对集矿机和输送站之间最小安全距离的影响. 本节模拟了 5 种工况, 分析得到输送管道最大等效应力随管道壁厚的变化规律, 如图 9 所示, 相应的最小安全距离列于表 4.

由图 9 和表 4 可见, 在管道内径不变的情况下, 随着管道壁厚的增加, 输送管道最大等效应力增加, 相应的最小安全距离亦增大. 从这个角度讲, 在确保矿料安全输送的条件下, 应尽可能选择壁厚较小的输送管道.

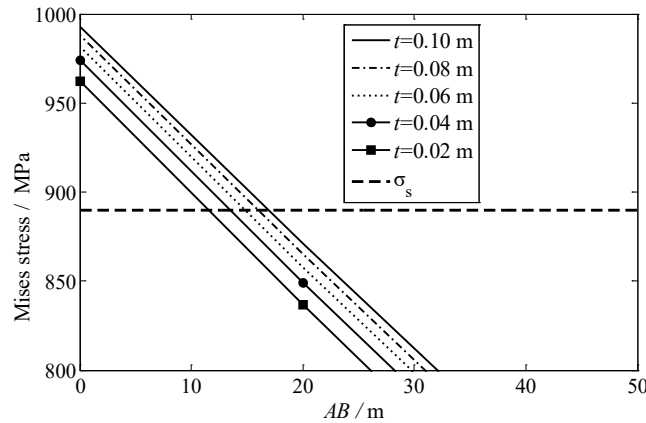


图9 不同壁厚管道的最大应力

Fig.9 The maximum stress in the pipeline of different wall thickness

表4 不同壁厚下的最小安全距离

Tab.4 The minimum safe distance of the pipeline for different wall thickness

Section	Inner diameter $d$ / m	Outside diameter $D$ / m	Wall thickness $t$ / m	Safe distance $L$ / m
1	0.2032	0.4032	0.10	16.9
2	0.2032	0.3632	0.08	15.9
3	0.2032	0.3232	0.06	14.8
4	0.2032	0.2832	0.04	13.4
5	0.2032	0.2432	0.02	11.5

Note: The mathematical regression expression of the minimum safe distance for different pipe wall thickness:  
 $L = -375t^2 + 111.5t + 9.46$ .

### 2.2.2 屈服应力对最小安全距离的影响

由于石油行业中 API 钢级材料的密度大多为  $7\ 850\ \text{kg/m}^3$ , 而弹性模量变化较小, 大多介于  $190\ \text{GPa} \sim 220\ \text{GPa}$  之间, 屈服应力变化较大, 基本在  $250\ \text{MPa} \sim 950\ \text{MPa}$  范围内, 故本文主要分析材料的屈服应力对最小安全距离的影响, 管道截面尺寸和材料参数均如表 3 所示.

选取常用的几种钢级的材料, 计算得到的最小安全距离如表 5 所示. 此外, 为了进一步分析材料屈服应力和最小安全距离的对应关系, 本文在  $250\ \text{MPa} \sim 950\ \text{MPa}$  的屈服应力范围内, 每隔  $50\ \text{MPa}$  取值屈服应力并求得相应的最小安全距离, 如图 10 中散点所示, 图中的直线为相应的数学回归线. 可以看出随着屈服应力的减小, 管道最小安全距离呈线性增加. 因此, 在输送管道材料的选择时, 要考虑其屈服应力不宜太小, 具体选材应结合集矿机运动轨迹范围来确定.

表5 不同钢级的材料对应的最小安全距离

Tab.5 The minimum safe distance of the material with different steel grades

Material	Yield strength $\sigma_s$ / MPa	Safe distance $L$ / m
P110	862	22
Q125	689	51
N80	655	57
J55	517	82.5
H40	414	103

## 3 结论

本文以  $6\ 000\ \text{m}$  水深采矿工程为背景, 主要研究了海底集矿机与移动输送站之间的安全距离, 通过分析两者之间输送管道中的等效应力, 得到以下结论.



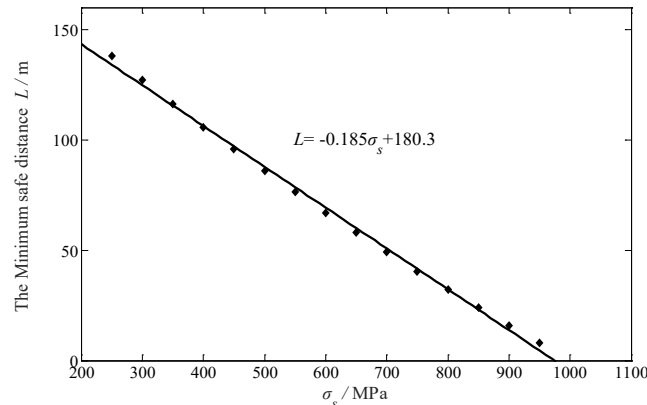


图 10 不同屈服应力的材料对应的最小安全距离

Fig.10 The maximum stress of pipeline for different section thickness

(1) 集矿机靠近输送站时, 输送管道应力迅速增加, 通过比较输送管道中最大等效应力与管道材料的屈服应力, 发现集矿机和输送站之间有一个最小安全距离, 若两者距离小于此值, 则管道会发生破坏. 这一概念有助于定量评估集矿机和输送站之间输送管道的结构安全.

(2) 管道壁厚对管中最大等效应力和最小安全距离有重要影响, 在内径不变的情况下, 输送管道中最大等效应力随壁厚的增大而增大, 最小安全距离与管道壁厚呈二次回归关系.

(3) 输送管道材料的屈服应力对最小安全距离的影响不容忽视, 在管道截面尺寸和材料参数不变的条件下, 最小安全距离随屈服应力的增大近似呈线性减小的规律.

需要指出的是, 本文聚焦于研究海流作用下集矿机与移动输送站的最小安全距离, 并未考虑管道内流、管道扭转及面外失稳等因素的影响. 应用中, 最小安全距离应综合考虑这些因素的影响予以确定.

#### 参考文献:

- [1] 郭小刚, 金星, 张俊彦. 支座位移非线性迭代法确定软管平衡形态[J]. 力学季刊, 2000, 21(3):357-364.  
GUO X G, JIN X, ZHANG J Y. Determination of the equilibrium configuration of flexible pipe with nonlinear iterative method by moving support constraint[J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2000, 21(3):357-364(in Chinese).
- [2] 郭小刚, 张立人, 金星, 等. 深海采矿流-固耦合软管系统的非线性动力学模型[J]. 工程力学, 2000, 17(3):93-104.  
GUO X G, ZHANG L R, JIN X, et al. Nonlinear dynamic model of the fluid-solid coupled flexible pipe systems for deep sea mining[J]. Engineering Mechanics, 2000, 17(3):93-104(in Chinese).
- [3] 王刚, 刘少军, 李力. 深海采矿扬矿系统水下构形与动力学特性数值仿真[J]. 计算机仿真, 2005, 22(10):295-298.  
WANG G, LIU S J, LI L. Numerical simulation of configuration and dynamics characteristics for lift pipe system in deep sea mining[J]. Computer Simulation, 2005, 22(10):295-298(in Chinese).
- [4] WANG G, LIU S J, LI L. FEM modeling for 3D dynamic analysis of deep-ocean mining pipeline and its experimental verification[J]. Journal of Central South University of Technology, 2007, 14(6):808-813.
- [5] 符瑜. 深海采矿软管输送特性研究[D]. 北京: 中央民族大学, 2019.  
FU Y. Study on conveying characteristics of flexible hose in deep sea mining[D]. Beijing: MinZu University of China, 2019(in Chinese)
- [6] 符瑜, 曹斌, 夏建新. 深海采矿系统浮力配置对集矿车受力状态影响[J]. 矿冶工程, 2019, 39(2):15-18.  
FU Y, CAO B, XIA J X. Influence of parameter configuration of hose buoyancy for deep-sea mining system on the stress state of mining vehicle[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2019, 39(2):15-18(in Chinese).

- [7] 徐海良, 何清华. 深海采矿输送软管几何非线性静力分析[J]. 机械设计与研究, 2005, 21(3):71-74.  
XU H L, HE Q H. Geometric nonlinear static force analysis on the sea mining flexible mineral transporting pipe[J]. Machine Design and Research, 2005, 21(3):71-74(in Chinese).
- [8] 郭浚良. 深海采矿系统不同构形扬矿软管的流固耦合动力学分析[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2018.  
GUO H L. The fluid-solid coupling dynamic analysis of the lifting flexible pipe with different configurations in the deep-sea mining system[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2018(in Chinese).
- [9] 王志, 饶秋华, 刘少军, 等. 深海采矿扬矿软管流固耦合力学分析[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2009, 40(4):1106-1113.  
WANG Z, RAO Q H, LIU S J, et al. Mechanical analysis of fluid-solid interaction of flexible hose in deep ocean mining[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2009, 40(4):1106-1113(in Chinese).
- [10] 王志. 深海采矿扬矿管道工作特性的流固耦合分析与综合评价研究[D]. 长沙: 中南大学, 2010.  
WANG Z. Fluid-solid coupling analysis and comprehensive evaluation of working characteristics of pipelines in deep-ocean mining system[D]. Changsha: Central South University, 2010(in Chinese).
- [11] OH J W, LEE C H, HONG S, et al. A study of the kinematic characteristic of a coupling device between the buffer system and the flexible pipe of a deep-seabed mining system[J]. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 2014, 6(3):652-669.
- [12] 李艳, 成赞, 郭轶可, 等. 内外流共同作用下输流软管力学特性研究[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(3):182-187.  
LI Y, CHENG Y, GUO Y K, et al. Mechanical characteristics research on flexible hose under the influence of internal and external fluid[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2018, 29(3):182-187(in Chinese).
- [13] 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.  
XIAO L J, ZENG Q L, ZHANG W M. Analysis of nonlinear offsetting characteristics on deep ocean mining pipe[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2002, 38(8):94-99(in Chinese).
- [14] 肖林京, 张文明, 方湄. 深海采矿扬矿管非线性动态特性研究[J]. 煤炭学报, 2002, 27(4): 417-421.  
XIAO L J, ZHANG W M, FANG M. Study of nonlinear dynamic characteristics on deep ocean lifting pipe[J]. Journal of China Coal Society, 2002, 27(4):417-421(in Chinese).
- [15] 韩庆珏. 深海履带式集矿机打滑及路径跟踪控制问题研究[D]. 长沙: 中南大学, 2014.  
HAN Q J. Slip and path tracking control of the deep sea tracked miner[D]. Changsha: Central South University, 2014(in Chinese).
- [16] 徐海良, 何清华. 海洋采矿输送管道运动阻力分析[J]. 矿冶工程, 2004, 24(5):9-12+15.  
XU H L, HE Q H. Analysis on the resistance to motion in the ocean transportation system[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2004, 24(5):9-12+15(in Chinese).
- [17] WANG Z, RAO Q H, LIU S J. Fluid-solid interaction of resistance loss of flexible hose in deep ocean mining[J]. Journal of Central South University, 2012, 19(11):3188-3193.
- [18] 王刚. 深海采矿作业过程扬矿管线系统空间构形与动态特性研究[D]. 长沙: 中南大学, 2009.  
WANG G. Research on space configuration and dynamic characteristic of lifting pipeline system in the process of deep ocean mining[D]. Changsha: Central South University, 2009(in Chinese).
- [19] CN206158747U. 一种深海采矿系统[P]. 中国科学院深海科学与工程研究所, 2017.  
CN206158747U. A deep-sea mining system[P]. Institute of Deep-Sea Science and Engineering, Chinese Academy of Sciences, 2017(in Chinese).
- [20] 王文明. ABAQUS 有限元分析与案例精通—在海洋石油工程中的应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2017.  
WANG W M. ABAQUS finite element analysis and case study-application in offshore petroleum engineering[M]. Beijing: China Machine Press, 2017(in Chinese).