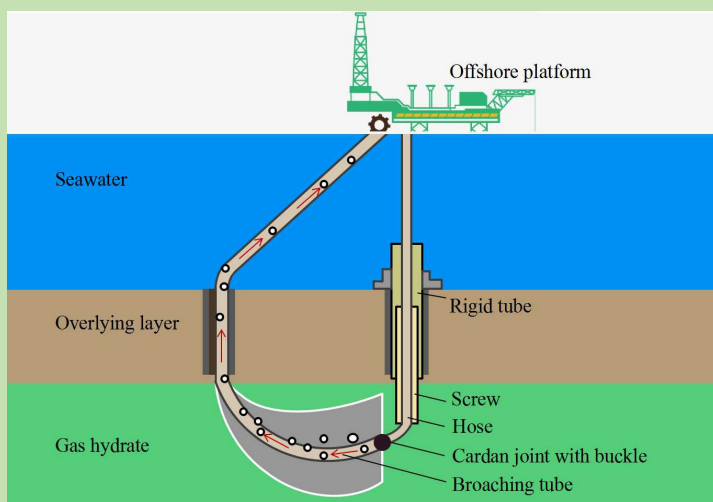


## New broaching exploitation method and feasibility analysis of marine gas hydrate reservoirs

Zhen SONG\*, Kaili LI, Jiahang SUN, Zhonglei LÜ

School of Mechatronic Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China

**Abstract:** At present, the main methods for extracting natural gas hydrates are thermal extraction, vacuum extraction and chemical reagent extraction. They are mainly used for the development of diagenetic hydrate reservoirs in tight cap rocks, and cannot be used to extract shallow non-diagenetic hydrates that account for 85% of deep water resources. Taking the Shenhu area of the South China Sea as the mining target area, a new type of broaching exploitation method was proposed on the basis of solid-state fluidization theory. A three-dimensional model of broaching exploitation method was established, the working principle, working



steps and stope distribution of the new technology were explained in detail, and a broaching tube was designed for broaching, collecting and transportation mining tools. Use the knowledge of geotechnical mechanics to analyze the shear stress of the goaf produced by the broaching exploitation method can ensure that the goaf does not collapse and obtain the maximum stope volume. The force analysis of the broached pipe according to the mining conditions ensured that the broached pipe can work safely and stably. Finally, the daily gas production of the broaching technology was estimated. The results showed that the larger the goaf radius and the mining angle were, the more obvious the shear stress concentration in the goaf. The maximum shear stress occurred at the start and end positions of the upper part of the goaf. The maximum stress of the broaching tube during the mining process was less than the yield stress of the material. The daily gas output of the broaching technology was estimated to be 142000 m<sup>3</sup>, which had practical application potential.

**Key words:** natural gas hydrate; broaching; mining method; goaf; daily gas production

收稿: 2019-12-25, 修回: 2020-02-01, 网络发表: 2020-02-13, Received: 2019-12-25, Revised: 2020-02-01, Published online: 2020-02-13

基金项目: 中国博士后科学基金面上项目(编号: 2017M623061); 石油天然气装备教育部重点实验室开放基金项目(编号: OGE201702-13)

作者简介: 宋震(1981-), 男, 四川省成都市人, 博士, 副研究员, 主要从事天然气水合物开采工艺及装备、多场耦合计算等方面的研究工作, E-mail: zhen.song@rwth-aachen.de.

**引用格式:** 宋震, 李凯莉, 孙嘉航, 等. 海洋天然气水合物储层拉削开采新方法及其可行性分析. 过程工程学报, 2020, 20(10): 1234-1240.

Song Z, Li K L, Sun J H, et al. New broaching exploitation method and feasibility analysis of marine gas hydrate reservoirs (in Chinese). Chin. J. Process Eng., 2020, 20(10): 1234-1240, DOI: 10.12034/j.issn.1009-606X.219377.

# 海洋天然气水合物储层拉削开采新方法及可行性分析

宋震\*, 李凯莉, 孙嘉航, 吕忠蕾

西南石油大学机电工程学院, 四川 成都 610500

**摘 要:** 针对深水浅层非成岩天然气水合物借鉴刨煤机刨削采煤过程提出一种新的拉削开采方法, 参照拉刀结构特点设计了一种集开采、收集和输送为一体的拉削管。建立了拉削开采三维模型, 对其工作原理和工作步骤进行了说明。用有限元仿真对采空区和拉削管受力进行了分析。结果表明, 岩土力学仿真下采空区开采半径和开采角度的增大都会引起剪切应力的增加, 最大剪切应力发生在采空区上部的起始位置和终止位置; 在不发生剪切破坏的采空区中选择体积较大者作为理想采空区, 估算出拉削开采方法的日产气量为  $142\,000\text{ m}^3$ , 具有应用潜力; 开采工况下, 拉削管的最大等效应力小于管材的屈服极限, 表明开采过程中拉削管处于弹性形变, 满足方法需求。

**关键词:** 天然气水合物; 拉削; 开采方法; 采空区; 日产气量

中图分类号: P744.4

文献标识码: A

文章编号: 1009-606X(2020)10-1234-07

## 1 前言

天然气水合物俗称可燃冰, 是在一种高压低温环境下产生的类冰状清洁能源, 主要蕴藏于海底沉积物和陆地永久冻土层中。因其广泛的分布和极高的能源密度成为油气工业界长期研究的热点。目前水合物开采的热门理论与方法主要包括热激法、降压法、化学剂法和固态流化法。热激法、降压法和化学剂法的基本原理主要通过人为破坏天然气水合物稳定存在的温度和压力条件, 使天然气水合物不能在原来的环境中稳定存在, 进而分解出主要成分为甲烷的天然气和水, 再通过生产井采集气体<sup>[1-3]</sup>。上述 3 种开采方式主要用于具有一定圈闭构造的成岩型水合物矿层开发<sup>[4]</sup>, 存在不能精准有效地控制水合物的分解速度及开采范围方面的不足, 不适用于占深海资源量 85% 的深水浅层非成岩水合物的开采。

2012 年周守为等<sup>[5]</sup>针对深水浅层非成岩水合物的开采提出了固态流化开采新方法, 其基本思路是先利用机械法破碎天然气水合物, 再将破碎浆体通过密闭管道泵送至下游设备进行水合物分离, 实现天然气水合物安全、可控、经济的开采目标。目前海洋天然气水合物的固态流化开采工具主要有王国荣等<sup>[6,7]</sup>研制的射流破碎工具和宋震等<sup>[8]</sup>设计的变截面伞式工具。虽然两者均适用于实现固态流化开采, 但前者的开采直径较小, 仅为 0.8 m, 限制了厚储层条件下天然气水合物的开采效率; 后者虽然具有较大的开采范围和较高的开采速率, 但其伞式工具刚度极高, 需在转向段进行较复杂的扩井作业, 否则极易破坏转向段井筒。而刨煤机往复刨削落煤

虽然效率较高, 但不能直接用于具有一定埋深的水合物藏开采, 且对矿藏破碎不充分, 难以实现直接管输。

为解决现有工具原型和方法的不足, 本工作基于固态流化开采原理, 针对深水浅层非成岩水合物, 对主要工艺及其关键配套工具进行重构, 提出了一种新型的往复拉削开采方法, 并对主要结构进行了建模与仿真设计, 结果表明该方法可在很大程度上提高深水浅层非成岩天然气水合物开采的安全性及经济性, 为深水浅层非成岩天然气水合物的开采提供了新思路。

## 2 拉削开采方案及工作原理

### 2.1 开采方案

采用拉削开采方法对一块水合物储层进行开采, 储层可划分为多个采场, 每个采场的开采过程相似, 主要包括以下 4 个步骤: (1) 进行竖井钻井, 直至水合物储层与下伏层交界面停止; (2) 在距竖井井眼一定距离处打两支夹角为  $45^\circ$  的斜井, 斜井终点定位在水合物储层底部的竖井上, 并对上覆层中的竖井和斜井进行完井; (3) 下入特制拉削工具进行拉削开采作业, 同时采集拉削产生的浆体混合物并将其运送至海上平台, 得到天然气和剩余浆体; (4) 在分离后的剩余浆体中再加入适当比例的泥砂进行采空区充填。

### 2.2 工作原理

如图 1 所示, 将目标储层分为上下两层, 使用上分层充填采矿法进行水合物藏采掘, 分层采掘, 分层回填。拉削开采方法的工具主要由两根拉削管、一根光滑软

管、一根刚性管和一根空心螺杆构成。刚性管固定在海底并与螺杆通过螺纹连接。两根拉削管穿入斜井，通过带卡扣的万向节与从空心螺杆内穿出的光滑软管连接。拉削管和软管由海上平台掌控提拉和下放。

在开采过程中，当光滑软管与螺杆的相对位置不变时，同时控制光滑软管和螺杆的上行和下放可以控制万向节在铅垂方向的移动，而张紧的两根拉削管和光滑软

管相互配合，可以控制万向节在水平方向的移动。以两个斜井井眼和万向节为顶点，两根拉削管为两边，通过万向节在铅垂方向上的一次往复运动，形成了拉削一层水合物的一个周期；随后，万向节在水平方向持续进给，便形成了拉削若干层水合物的若干个周期，图 2 为上、下分层开采周期示意图。

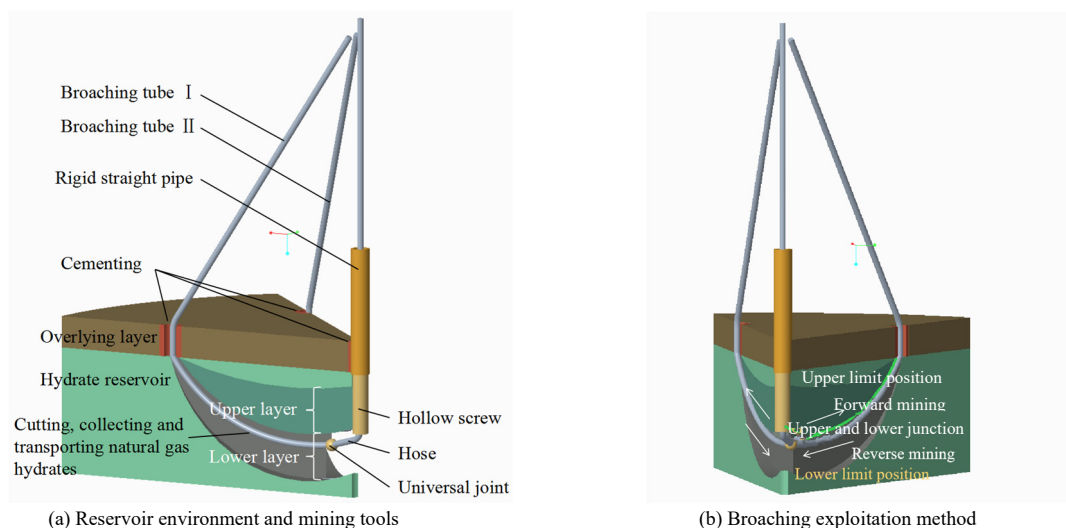


图 1 拉削开采工作原理

Fig.1 Schematic drawing of broaching work principle



图 2 不同开采周期采空区示意图

Fig.2 Schematic diagram of goaf in different mining cycles

图 3 为拉削管与水合物被采表面的接触示意图，在整个开采过程中拉削管与水合物储层的接触面始终是一个圆心角为  $180^\circ$  圆弧的空间曲面(结合图 1)，拉削管其余表面暴露于采空区中。

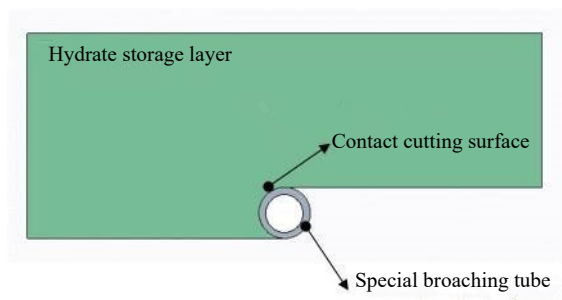


图 3 拉削接触示意图

Fig.3 Schematic diagram of broaching contact model

图 4 为借鉴拉刀结构特点<sup>[9]</sup>设计的拉削管，在拉削过程中刀齿切削天然气水合物储层得到细腻的浆体混合物，浆体流经分屑槽最终在负压作用下由拉削管管体采集孔吸入管内。如果调整管内负压至适当范围，可使水合物碎屑在拉削管内完成分解，并继续沿拉屑管道上升至海上平台。当开采作业过程中泥砂阻力过大时，可以加大拉削管内的泵吸压力，使拉削管外采集孔周围的水合物分解加速，导致水合物储层由比较致密变得相对松软，减小阻力便于开采。

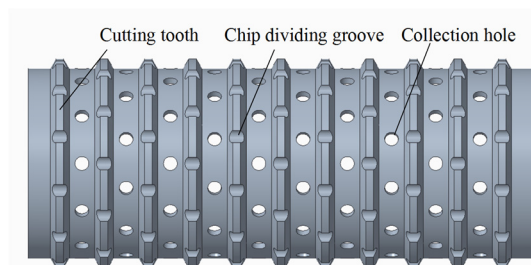


图 4 特制拉削管

Fig.4 Special broaching tube

具体作业步骤：

(1) 两根拉削管穿入斜井，光滑软管穿过空心螺杆，

拉削管头部卡入光滑软管头部带卡扣的双十字万向节中, 完成工具连接。

(2) 首先进行下分层开采。海上平台对两根拉削管施加同等拉力, 在上提拉削管的同时缓慢下放螺杆和软管(螺杆与软管的相对位置保持不变), 使两根拉削管与天然气水合物储层发生相对滑动, 此为正方向开采, 如图 1(b)所示。开采同时在拉削管内施加一定的泵吸压力, 及时采集拉削所得的浆体混合物。接着缓慢下放拉削管, 使螺杆和软管上行, 完成反方向开采。如此往复, 直到下分层的上部设计极限位置, 从而完成一次拉削去程。

(3) 继续保持光滑软管与螺杆的相对位置不变, 同时整体下放拉削管、光滑软管与螺杆, 直至采场底部起始位置, 完成一次回程。因为在去程拉削过, 所以在回程中两根拉削管与天然气水合物储层不会显著接触。

(4) 返回起始位置后, 根据拉削厚度, 将光滑软管从螺杆内伸长一个拉削厚度的长度, 重复(2)和(3)开采步骤。下分层开采至设计尺寸后立即从斜井并眼对下分层采空区进行压力注浆充填, 充填的同时进行上分层水合物藏开采。

(5) 当上分层开采完成后回收开采工具, 并及时充填上分层采空区。图 5 为分层分采最终形成的类 V 形的竖直采空区。

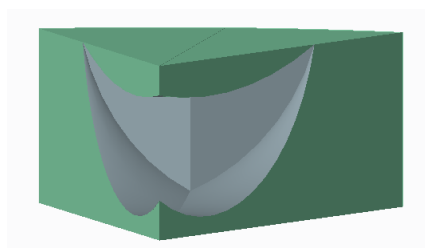


图 5 采空区示意图  
Fig.5 Goaf illustration

(6) 上分层充填的同时, 可在该采场的相对方向(而非相邻位置, 以提高安全性)重复以上所有步骤。直至竖井周围水合物矿床形成如图 6 所示的“桃花状”相间开

采的采场区域(图中数值代表开采顺序), 在保证采空区回填的松软泥砂不发生垮塌的情况下, 最大限度地利用竖井开采水合物。而整体的水合物矿床可以由多个“桃花状”采场区域组成覆盖。

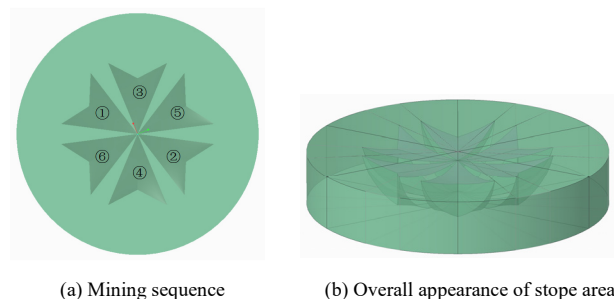


图 6 理想采空区  
Fig.6 Ideal shallow goaf mode

### 3 可行性分析

#### 3.1 采场形状分析

为了保证天然气水合物经济且高效地开采, 并最大可能降低安全风险, 有必要对开采后天然气水合物储层的力学行为开展研讨。分层充填的滞后性导致采空区的最大体积为整个下分层开采体积(或整个上分层开采体积), 据此提取采空区有限元模型。

##### 3.1.1 有限元模型及网格划分

有限元模型如图 7(a)所示, 水合物储层是一个底面半径 600 m、高 60 m(南海神狐海域平均储层厚度)的圆柱体。采场位于储层中央, 假设拉削管在上、下极限位置处形似圆弧, 采场上部储层最薄处 21 m, 底部最薄处 21 m。由于模型对称所以仅对域的一半建模以减小计算成本。图 7(b)为模型的俯视图, 斜井井眼与竖井井眼之间的距离、万向节的极限位置, 同时决定了采空区的形状和体积。 $\angle\alpha$  为拉削开采角度,  $L$  为开采半径,  $\angle\beta=45^\circ$  为两斜井之间的夹角。选择结构化网格用于降低模型的计算成本, 并对采场周围网格进行边界细化, 用于确保应力集中区解析结果更准确。

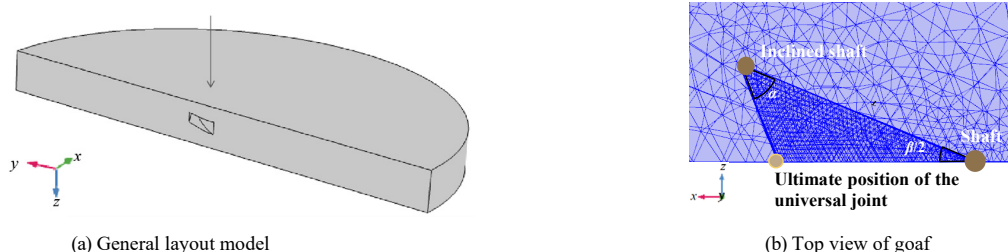


图 7 采空区几何模型  
Fig.7 Geometric model of goaf

### 3.1.2 边界条件

应力分布和地表沉降的大小是判断采空区是否垮塌的重要参数,也是确定采场尺寸的首要标准。假设在外力作用下水合物储层材料的变化规律符合岩土力学性质,据此模拟拉削开采完成后采空区周围水合物藏的力学行为。我国南海神狐海域水合物沉积物主要属于泥质中细粉沙<sup>[10]</sup>,沉积物粒径较小,强度较低。故选取李令东等<sup>[11]</sup>对水合物沉积物力学性质研究中所使用的强度较低的膨润土岩样相关参数作为有限元计算参数,具体情况如表 1 所示。土壤塑性材料选择 Drucker-Prager 准则,并匹配 Mohr-Coulomb 准则使计算结果更可靠。

表 1 水合物的岩土力学参数<sup>[11]</sup>

Table 1 Geotechnical mechanical parameters of hydrate<sup>[11]</sup>

Parameter	Value
Elasticity modulus/MPa	749
Poisson ratio	0.32
Density/(kg/m <sup>3</sup> )	2600
Cohesion/MPa	1.2
Internal friction angle, $\varphi/^\circ$	7.2
Biot-Willis coefficient	1
Confining pressure/MPa	16.37

以水深 1274 m,海底以下 135~170 m 范围内存在平均厚度约 60 m 的水合物储层为前提。不考虑上覆层支撑作用,折算模型顶部大约承受海底压力 12.86 MPa 及地层应力 3.51 MPa。储层由地基支撑,因此模型底部边界处使用 y 轴方向的位移约束。圣维南原理认为近处的应力集中对远处的影响可以忽略不计,因此在水合物储层研究范围足够大的情况下,开采后的局部应力集中不会影响模型侧面的应力分布,所以模型侧面采用滚动边界使模型在水平方向受力平衡,而在铅垂方向允许有微小形变。模型竖直平面使用对称边界条件,采空区内部各个面上施加 13 MPa 的液柱静压力。

### 3.1.3 仿真结果分析

表 2 为采空区形状参数优化方案及结果,开采半径分别取 50, 55 和 60 m。拉削开采角度为 30°~60°,调节幅度为 5°。天然气水合物采场形状分析属于岩土力学问题,土壤的破坏通常都是剪切破坏<sup>[12]</sup>,所以仿真结果主要用于提取剪切应力。由图 8 可以看出,由于开采半径和开采角度的增大使采空区体积增大,导致对应的最大剪切应力也逐渐增加。由文献<sup>[10]</sup>中膨润土沉积物岩样的莫尔圆及强度包络线计算得围压 16.37 MPa 时岩样的极限抗剪强度为 3.27 MPa。在所有最大剪切应力小于水合物储层抗剪强度的采场中,体积最大者所对应的各尺寸即为理想的采场尺寸。从偏于安全角度考虑,最终将

开采角度 45°、开采半径 55 m、开采体积 12354 m<sup>3</sup> 定为理想的采空区形状。

表 2 采场形状的优化方案及结果

Table 2 Optimization scheme and results of stope shape

Mining angle/ $^\circ$	Maximum shear stress at the following mining radius/MPa		
	50 m	55 m	60 m
30	2.43	2.59	2.79
35	2.55	2.85	3.09
40	2.75	3.10	3.14
45	3.15	3.20	3.33
50	3.18	3.25	3.54
55	3.26	3.51	3.60
60	3.70	3.92	4.33

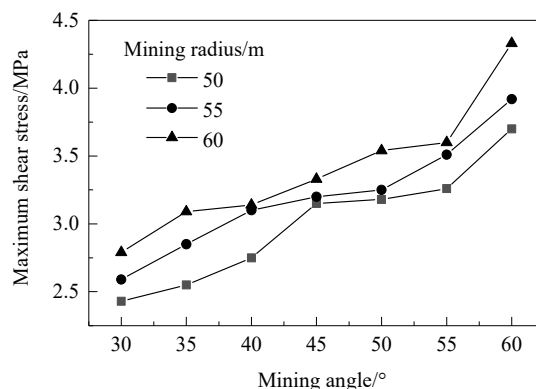


图 8 各采场的最大剪切应力图

Fig.8 Maximum shear stress of each stope

图 9(a)为理想状态采空区的剪切应力分布云图。可以看出,剪切应力有两处集中区,分别位于上弧线的起始位置和终止位置,最大剪切应力为 3.20 MPa,小于水合物储层的极限抗剪强度 3.27 MPa,因此上覆层不会发生失稳垮塌。图 9(b)为理想采空区的有效塑性应变云图,圆圈部分为水合物储层发生塑性变形的区域,可以看出储层的大部分区域保留在弹性范围内,只有局部发生了微小的塑性变形(最大塑性变形为 0.16%),变形区主要分布于采空区的尖角位置。

## 3.2 拉削开采过程的力学分析

### 3.2.1 有限元模型及网格划分

开采作业前首先要保证所设计的拉削管能够在不失效的状态下安全通过斜井,所以需要提前对其进行数值模拟分析。如图 10 所示,取实际开采时斜井周围的水合物和拉削管为研究对象,模拟拉削管开采斜井周围水合物时的应力集中状况。以实际深海储层平均厚度为 60 m 计算,将斜井轨迹近似为半径 100 m 的六分之一圆弧。切削管外径 0.3 m,壁厚为 10 mm。仅对斜井与



拉削管的接触部分进行应力分析，考虑模型形状规律且不复杂，因此采用扫掠-分布的网格划分方法，将以上

物理模型进行网格划分(图 11)。

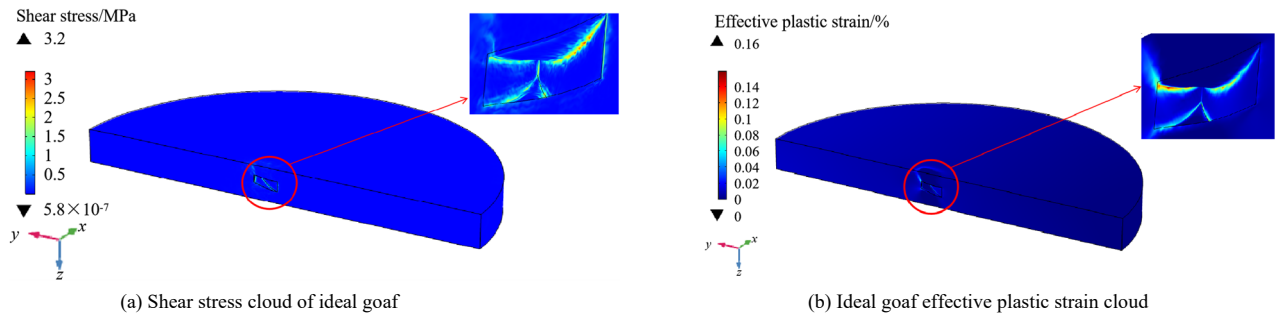


图 9 理想状态采空区仿真结果云图

Fig.9 Cloud diagram of simulation results of goaf in ideal state

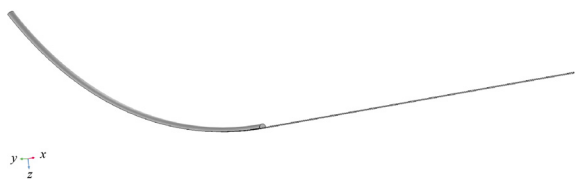


图 10 拉削管与水合物的接触模型

Fig.10 Contact model between lathe tube and hydrate

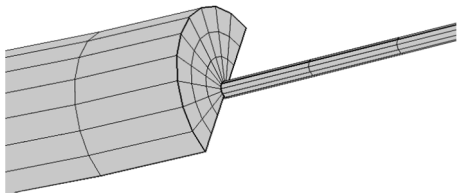


图 11 网格细节展示

Fig.11 The grid details

3.2.2 边界条件

使用多体动力学基本理论分析拉削管开采作业时的应力状态。将拉削管定义为线弹性力学模型，其前端面在斜井周围水合物内按照轴中心轨迹给予指定的位移约束，并保证拉削管前端穿出斜井一段距离。拉削管与水合物为对接触。估算切削阻力<sup>[13,14]</sup>为  $2.1 \times 10^5$  N，添加水合物给拉削管的垂直方向的负载为 16 MPa。将斜井周围水合物定义为刚体域的固定约束，因此斜井周围水合物的材料属性不会影响问题的研究。拉削开采过程要求拉削管材料具有良好的韧性、塑性和耐磨性，所以将模型整体的材料属性定义为 40Cr，弹性模量 211 GPa，泊松比 0.277，密度  $7.85 \times 10^3$  kg/m<sup>3</sup>，屈服极限 785 MPa。

3.2.3 仿真结果分析

仿真结果使用 Von-Mises 应力综合判定拉削管是否进入塑性状态。Von-Mises 应力是一种当量应力，是用于判定复杂应力状况下材料是否进入塑性阶段的综合指标<sup>[15]</sup>。如图 12 所示，为了便于观察对象的云图颜色变化，将斜井周围水合物设置为不显示。可以看出，在进入斜井段的拉削管中部具有明显的应力集中，越远离中部位置最大等效应力越小。拉削管进入水合物储层属于弯曲过程，其曲率半径将由无限大变为与斜井相等，最大等效应力值为 755 MPa，小于拉削管管材 40Cr 的

屈服强度 785 MPa。表明开采过程中拉削管一直处于弹性形变，不会产生永久变形，可以安全不失效地进行开采作业。

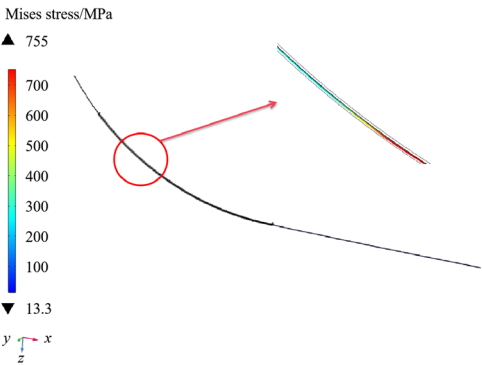


图 12 开采时拉削管的应力云图

Fig.12 Stress cloud map of the tubing during mining

4 日开采量估算

据我国南海神狐海域的取样结果，将各参数保守取值如下：水合物饱和度 45%、孔隙度 0.4、水合物的储气量 168 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>。对于拉削开采而言，影响日开采量的主要因素为切进速度与上提下放往复速度。参考下钻速度<sup>[16]</sup>和钻具切削速度<sup>[17]</sup>，取去程拉削速度 0.8 m/min，回程下放速度 36 m/min。开采一个完整的“类 V 形花

瓣”用时 126 h, 开采速率为  $3.27 \text{ m}^3/\text{min}$ , 按照参考文献[5]中式(4)得拉削开采的日产气量为  $142\,000 \text{ m}^3$ , 证明使用拉削法开采海洋水合物具有切实的应用前景。

## 5 结论

基于天然气水合物固态流化开采方法, 针对深水浅层非成岩水合物的开采提出了一种新型的往复拉削开采方法, 并从安全性和产气量方面对其可行性进行了探究, 得到以下结论:

(1) 提出了一种新式的往复拉削开采方法, 借鉴拉刀的结构特点, 设计了一种用于切削、收集、输送的拉削管道。

(2) 提出了一种开采回填方案, 在防止回填松软泥砂滑塌的情况下, 可最大程度利用已有钻井开采作业。

(3) 运用岩土力学知识对采场的形状参数进行仿真优化, 证实了采空区形状对剪切应力的分布及大小影响明显, 开采半径和开采角度增大均导致剪切应力增加。

(4) 建立了拉削管与斜井周边水合物模型, 对开采过程中拉削管的受力情况进行了分析, 计算所得等效应力云图表明最大应力小于拉削管材料的屈服极限, 开采过程属于弹性形变。

(5) 以神狐海域水合物储层特征数据为基础, 对使用拉削开采方法的日产气量进行预估, 结果表明往复拉削开采具有切实的应用潜力。

## 参考文献

- [1] 宋永臣, 阮徐可, 梁海峰, 等. 天然气水合物热开采方法研究进展 [J]. 过程工程学报, 2009, 9(5): 1035–1040.  
Song Y C, Ruan X K, Liang H F, et al. Research advance in thermal recovery of natural gas hydrate [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2009, 9(5): 1035–1040.
- [2] 王屹, 李小森. 天然气水合物开采方法研究进展 [J]. 新能源进展, 2013, 1(1): 69–79.  
Wang Y, Li X S. Research progress of natural gas hydrate production technology [J]. Advances in New and Renewable Energy, 2013, 1(1): 69–79.
- [3] Zhang X H, Lü X B, Liu L L. Advances in natural gas hydrate recovery methods [J]. Progress in Geophysics, 2014, 29: 858–869.
- [4] 周守为, 陈伟, 李清平, 等. 深水浅层非成岩天然气水合物固态流化试采技术研究及进展 [J]. 中国海上油气, 2017, 29(4): 1–7.  
Zhou S W, Chen W, Li Q P, et al. Research on the solid fluidization well testing and production for shallow non-diagenetic natural gas hydrate in deep water area [J]. China Offshore Oil and Gas, 2017, 29(4): 1–7.
- [5] 周守为, 赵金洲, 李清平, 等. 全球首海洋天然气水合物固态流化试采工程参数优化设计 [J]. 天然气工业, 2017, 37(9): 1–14.  
Zhou S W, Zhao J Z, Li Q P, et al. Optimal design of the engineering parameters for the first global trial production of marine natural gas hydrates through solid fluidization [J]. Natural Gas Industry, 2017, 37(9): 1–14.
- [6] 王国荣, 黄蓉, 钟林, 等. 固态流化采掘海洋天然气水合物藏破碎参数的优化设计 [J]. 天然气工业, 2018, 38(10): 84–89.  
Wang G R, Huang R, Zhong L, et al. An optimal design of crushing parameters of marine gas hydrate reservoirs in solid fluidization exploitation [J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(10): 84–89.
- [7] 王国荣, 钟林, 周守为, 等. 天然气水合物射流破碎工具及其配套工艺方法 [J]. 天然气工业, 2017, 37(12): 68–74.  
Wang G R, Zhong L, Zhou S W, et al. Jet breaking tools for natural gas hydrate exploitation and their support technologies [J]. Natural Gas Industry, 2017, 37(12): 68–74.
- [8] 宋震, 孙颖, 李凯莉, 等. 适用于深水浅层非成岩天然气水合物固态流化开采的伞式工具 [J]. 天然气工业, 2019, 39(3): 133–139.  
Song Z, Sun Y, Li K L, et al. Research of umbrella-like tool for solid fluidization exploitation of shallow non-diagenetic gas hydrates in deep water [J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(3): 133–139.
- [9] 浦艳敏, 李晓红, 闫兵. 金属切削刀具选用与刃磨 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2016: 198–200.  
Pu Y M, Li X H, Yan B. Selection and sharpening of metal cutting tools [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2016: 198–200.
- [10] Liu C L, Ye Y G, Meng Q G, et al. The characteristics of gas hydrates recovered from Shenhu area in the South China Sea [J]. Marine Geology, 2012, 307/308/309/310: 22–27.
- [11] 李令东, 程远方, 孙晓杰, 等. 水合物沉积物试验岩样制备及力学性质研究 [J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2012, 36(4): 97–101.  
Li L D, Cheng Y F, Sun X J, et al. Experimental sample preparation and mechanical properties study of hydrate bearing sediments [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2012, 36(4): 97–101.
- [12] 李元松. 岩土力学 [M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2013: 127–141.  
Li Y S. Geotechnical mechanics [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2013: 127–141.
- [13] 张梦奇, 贾少山, 张建广. 截齿破岩阻力预测方法的对比分析 [J]. 煤矿机电, 2014, (4): 24–28.  
Zhang M Q, Jia S S, Zhang J G. Comparison and analysis of predictor methods for rock breaking resistance of bit [J]. Colliery Mechanical & Electrical Technology, 2014, (4): 24–28.
- [14] Evans I. A theory of the cutting force for point-attack picks [J]. International Journal of Mining Engineering, 1984, 2(1): 63–71.
- [15] 章顺虎. 塑性成形力学原理 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2016: 46–49.  
Zhang S H. Principles of plastic forming mechanics [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2016: 46–49.
- [16] 吴鹏程, 徐朝阳, 孟英峰, 等. 窄安全密度窗口地层钻井起下钻井底压力瞬态波动规律 [J]. 钻采工艺, 2016, 39(4): 22–26.  
Wu P C, Xu Z Y, Meng Y F, et al. Transient fluctuation law of bottom hole pressure in formation drilling with narrow safety density window [J]. Drilling & Production Technology, 2016, 39(4): 22–26.
- [17] 鄢泰宁. 岩土钻掘工程学 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2001: 90–93.  
Yan T N. Rock and soil drilling engineering [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2001: 90–93.