

# 天然气水合物喷射破碎压控滑套 冲蚀磨损特性研究

唐洋, 何胤, 姚佳鑫, 孙鹏

(西南石油大学, 成都 610500)

**摘要:** **目的** 研究天然气水合物开采过程中, 钻井液对喷射破碎压控滑套冲蚀磨损的影响规律及主要影响因素。**方法** 基于欧拉-拉格朗日算法的 DPM 模型, 建立了滑套冲蚀磨损数值分析模型, 预测了压控滑套在使用过程中易发生冲蚀磨损的区域。探究了不同的钻井液粒径、入口液相流速、质量流量及封堵块位置的变化, 对冲蚀磨损过程的影响规律。**结果** 压控滑套的易冲蚀区域为封堵块面、过流通道口、内壁面三个位置。在控制单因素变量条件下, 易冲蚀区域最大冲蚀率和冲蚀面积随着粒径增大而增大, 粒径从 0.1 mm 增大到 1.1 mm 时, 易冲蚀区域平均最大冲蚀率增大了 63.4 倍, 并在不同粒径段呈现不同变化趋势。随着封堵块与滑套距离减小, 易冲蚀区域平均最大冲蚀率增加, 距离从 50 mm 降低到 5 mm 时, 平均最大冲蚀率增大了 3.8 倍, 并在不同的距离段呈现不同变化趋势; 同时随着封堵块与滑套距离减小, 内壁面的冲蚀面积降低明显, 封堵块和过流通道冲蚀面积没有显著变化。随着入口流速和流体质量流量的增加, 易冲蚀区域最大冲蚀率呈现指数增加, 流速从 6 m/s 增大到 14 m/s 时, 易冲蚀区域平均最大冲蚀率增大了 9.5 倍, 流体质量流量从 0.001 kg/s 增大到 0.007 kg/s 时, 易冲蚀区域平均最大冲蚀率增大了 5.6 倍, 但冲蚀面积都没有显著变化。**结论** 滑套封堵块面、过流通道和内壁面最易发生冲蚀破坏。冲蚀颗粒直径应该小于 0.3 mm 为宜, 封堵块与滑套距离应该大于 30 mm, 同时入口流速和质量浓度越小, 冲蚀情况越好。综合最大冲蚀率数值及增长倍数分析, 粒径是冲蚀率增长的主要因素。该研究为喷射破碎压控滑套的设计和应用提供了指导意义。

**关键词:** 天然气水合物; 压控滑套; 固态流化开采; 冲蚀磨损; 冲蚀率; 数值模拟

**中图分类号:** TH117.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2021)02-0254-07

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2021.02.026

收稿日期: 2020-03-01; 修订日期: 2020-12-29

Received: 2020-03-01; Revised: 2020-12-29

**基金项目:** 国家自然科学基金青年基金 (52004235); 中国博士后科学基金资助项目 (2020M683359); 四川省科技应用基础研究项目 (2020YJ0152); 南方海洋科学与工程广东省实验室 (湛江) 基金 (ZJW-2019-03); 国家重点研发计划 (2018YFC0310200); 西南石油大学油气藏地质与开发国家重点实验室开放基金 (PLN201827); 博士后创新人才支持计划项目 (BX20190292); 四川省科技创新 (苗子工程) 培育及小发明小创造项目 (2020037)

**Fund:** National Natural Science Youth Foundation of China (52004235), Project Supported by China Postdoctoral Science Foundation (2020M683359), Basic Research Project of Science and Technology Application in Sichuan Province (2020YJ0152), Fund of Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhanjiang) (ZJW-2019-03), National Key R & D Program (2018YFC0310200), Open Fund of State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation (Southwest Petroleum University) (PLN201827), Post Doctoral Innovative Talents Support Program (BX20190292), Sichuan Science and Technology Innovation (Miaozi Project) Cultivation and Small Invention and Small Creation Project (2020037)

**作者简介:** 唐洋 (1986—), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为设备完整性、天然气水合物开采装备研制。邮箱: tangyanggreat@126.com

**Biography:** TANG Yang (1986—), Male, Doctor, Associate researcher, Research focus: equipment integrity and development of natural gas hydrate production equipment. E-mail: tangyanggreat@126.com

**引文格式:** 唐洋, 何胤, 姚佳鑫, 等. 天然气水合物喷射破碎压控滑套冲蚀磨损特性研究[J]. 表面技术, 2021, 50(2): 254-260.

TANG Yang, HE Yin, YAO Jia-xin, et al. Study on erosion and wear characteristics of pressure-controlled sliding sleeve for gas hydrate injection and crushing[J]. Surface technology, 2021, 50(2): 254-260.

## Study on Erosion and Wear Characteristics of Pressure-controlled Sliding Sleeve for Gas Hydrate Injection and Crushing

TANG Yang, HE Yin, YAO Jia-xin, SUN Peng

(Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

**ABSTRACT:** In order to study the influence law and main influencing factors of drilling fluid on the erosion and wear of injection & crushing pressure-controlled sliding sleeve during the exploitation of natural gas hydrate, based on the DPM model of Euler-Lagrange algorithm, this paper establishes a numerical analysis model of sliding sleeve erosion and wear to predict the areas where erosion and wear were likely to occur during the use of the pressure-controlled sliding sleeve, and explores the influence of different drilling fluid particle size, inlet liquid velocity, mass flow rate and sealing block position on the erosion and wear process. The erodible area of the pressure-controlled sliding sleeve was three locations: the sealing block surface, the cross flow crossing, and the inner surface. Under the condition of controlling single factor variable, the maximum erosion rate and erosion area of the erosion area increase with the increase of particle size. When the particle size increased from 0.1 mm to 1.1 mm, the average maximum erosion rate of the erodible area increased by 63.4 times, and showed different trends in different particle size sections. As the distance between the sealing block and the sliding sleeve decreased, the average maximum erosion rate of the erodible area increased. When the distance decreased from 50 mm to 5 mm, the average maximum erosion increased by 3.8 times and showed different trends at different distances. At the same time, as the distance between the sealing block and the sliding sleeve decreased, the erosion area of the inner surface decreased significantly, while that of the sealing block and the cross flow crossing was no significant change. With the increase of the inlet flow velocity and the fluid mass flow rate, the maximum erosion rate of the erodible area exhibited an exponential increase. When the flow velocity increased from 6 m/s to 14 m/s, the average maximum erosion rate of the erodible area increased by 9.5 times. When the fluid mass flow rate increased from 0.001 kg/s to 0.007 kg/s, the average maximum erosion rate of the erodible area increased by 5.6 times, but the erosion area did not change significantly. Therefore, the sealing block surface, cross flow crossing and inner surface of sliding sleeve are most prone to erosion damage. The diameter of the erosion particles should be less than 0.3 mm. The distance between the sealing block and the sliding sleeve should be greater than 30 mm. At the same time, the smaller the inlet liquid velocity and mass flow rate, the better the erosion. Based on the analysis of the maximum erosion rate and the multiple of growth, the particle size is the main factor for the increase of the erosion rate, which provides guidance significance for the design and application of the injection & crushing pressure-controlled sliding sleeve.

**KEY WORDS:** natural gas hydrate; pressure-controlled sliding sleeve; solid fluidization mining; erosion wear; erosion rate; numerical simulation

针对海底埋深浅、胶合性差等特点<sup>[1]</sup>的水合物开采,周守为<sup>[2-4]</sup>提出了“天然气水合物固态流化开采”的新工艺,通过喷射破碎压控滑套,将水合物钻进和开采过程合为一体<sup>[5-7]</sup>。在天然气水合物喷射破碎压控滑套作业过程中,压控滑套需要反复使用,非常容易受到冲蚀磨损,一旦发生冲蚀磨损,会影响滑套的开启和关闭情况,使得水合物开采不能正常进行。因此,对其进行相关的冲蚀磨损分析具有非常重要的意义。

随着计算流体力学和 CFD 等仿真软件的快速发展,国内外学者对流体冲蚀磨损行为已有一定的研究。易先中等<sup>[8]</sup>对水力压裂液对弯管的冲蚀进行了分析,得到了流速、粒径、密度等参数对冲蚀率的影响规律。蒋硕硕等<sup>[9]</sup>对流线型孔板流量计进行了液固两相流冲蚀磨损数值模拟,分析了不同形状流量计的冲

蚀情况。黄志强等<sup>[10]</sup>通过理论推导和室内实验,研究了钻杆的冲蚀磨损规律。黄勇等<sup>[11]</sup>对反循环钻井中水龙头弯管磨损进行了数值模拟,预测了冲蚀发生位置。王国荣等<sup>[12]</sup>采用离散相模型(DPM)和半经验材料去除模型,预测钻井节流阀质量损失和冲蚀分布,得到了一种减轻冲蚀的方法。Jafari 等<sup>[13]</sup>分析了四种耐磨钢板的冲蚀性能,分析了硬度、抗冲蚀性和耐磨度之间的关系。胡炳涛等<sup>[14]</sup>采用数值模拟的方法,研究了不同工况介质的物性参数对弯管的冲蚀失效影响。Habib 等<sup>[15]</sup>通过数值模拟的方法,分析了变径管液固两相冲蚀问题,得到了入口液相速度、颗粒粒径及收缩比等参数对变径管的冲蚀磨损影响。刘娟等<sup>[16]</sup>分析了水力机械中冲蚀磨损规律及抗磨措施研究进展,并提出了水力机械冲蚀磨损的研究发展方向

和前景预测。王明波等<sup>[17]</sup>通过数值模拟分析了钻杆内加厚区钻井液流动和岩屑颗粒冲蚀情况。由此可知,通过分析数值发现,工具冲蚀情况对于工具设计和应用有着重要指导意义,现有的冲蚀磨损分析都只是得到了普遍性规律,对工具不同部位的冲蚀面积、最大冲蚀率没有进行详细分析,也没有给出具体的可参考意见。同时,固态流化开采工艺是我国首先提出的工艺,压控滑套作为喷射破碎的主要部分,其可靠性至关重要,而目前国内外尚无对滑套的冲蚀磨损分析,这限制了该工具的设计和使用。

综上,本文基于欧拉-拉格朗日算法的 DPM 冲蚀预测模型,建立天然气水合物喷射破碎压控滑套冲蚀磨损模型,对不同物性钻井液流经不同参数结构的压控滑套进行数值模拟,预测了在滑套工作过程中易发生磨损冲蚀的区域,并通过分析工具易冲蚀区域的最大冲蚀率和冲蚀面积变化情况,得到了相关的影响规律,提出了相应的参考取值,以期对压控滑套的设计和优选提供指导,有利于丰富和推动我国水合物固态流化开采工艺的进一步发展。

## 1 天然气水合物喷射破碎压控滑套工作机理

固态流化开采工艺主要是通过双层管结构实现,

即:外层管内通过泵入的高压海水驱动涡轮马达,进而带动内层的涡轮泵旋转,同时利用高压海水,由喷头处射出破碎水合物;而内层管则通过涡轮泵的旋转,抽吸被喷射破碎的水合物。

压控滑套工具结构如图 1 所示。其原理是:利用钻井液在流过压控滑套时,滑套内部产生局部压力损失和沿程损失,通过改变钻井液流量大小,使滑套上下移动,实现压力控制其开启和关闭。水合物开采过程为钻井-回拖开采-钻井的循环过程,可避免常规钻进和开采反复起下钻的过程。

钻进阶段,通入的钻井液流量较小,对滑套的推力小于弹簧的初始弹力,滑套上的射流孔被外筒体挡住,钻井液从过流通道下流,如图 1 所示,红线为流体方向。

回拖开采过程,回拖管柱,同时增加钻井液流量,对滑套的推力增大,滑套压缩弹簧进一步向下移动,滑套上的射流孔露出,下行流道被封堵堵住,射流喷头开始喷射破碎作业。同时,自锁机构实现自锁,避免因流量变化使得滑套移动,进而影响喷射效率。滑套关闭状态如图 2 所示,红线为流体方向。

下一步钻进过程,再次增加钻井液流量,使得自锁机构解锁,然后减小钻井液流量,滑套受到弹簧力回弹,流体再次从过流通道下流,射流喷头停止作业,重复钻井阶段工作进行下一步钻井。

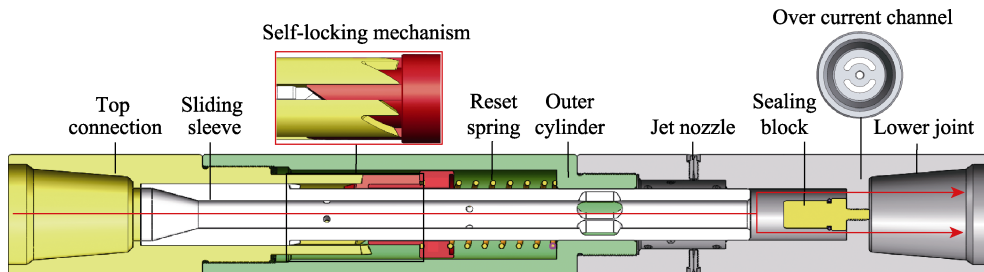


图 1 滑套开启状态图

Fig.1 Diagram of sliding sleeve at open state

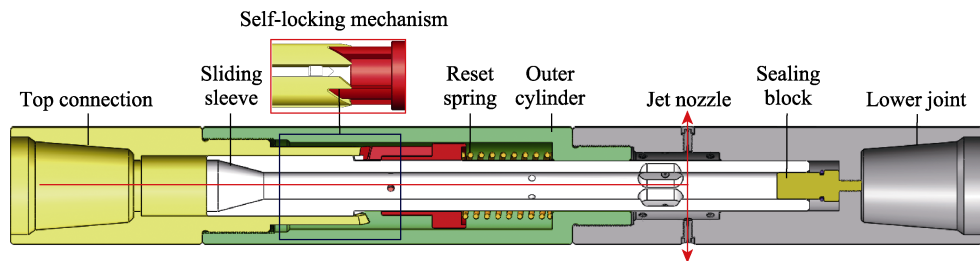


图 2 滑套关闭状态图

Fig.2 Diagram of sliding sleeve at closed state

## 2 压控滑套冲蚀磨损数值模拟

### 2.1 几何模型和参数

如图 3 所示,在滑套内流体的流动区域,冲蚀容易发生在流道突然颈缩的区域,如图 3 中标识的 A、

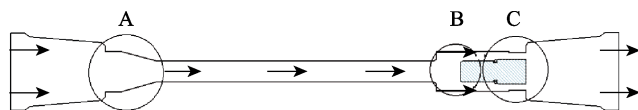


图 3 滑套流域图

Fig.3 Flow area diagram of sliding sleeve

B、C 处，同时对下部出口处进行网格细化，如图 4 所示。压控滑套冲蚀磨损模型相关参数如表 1 所示。



图 4 网格细化图  
Fig.4 Mesh refinement

表 1 钻井液基本参数  
Tab.1 Basic parameters of drilling fluid

Drilling fluid parameters	Parameter scale
Drilling fluid particle density $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	1500
Inlet velocity $v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	6-12
Particle diameter $d/\text{mm}$	0.1~1.1
Mass flow rate $r/(\text{kg}\cdot\text{s}^{-1})$	0.001~0.007
Viscosity of drilling fluid $\mu/(\text{mPa}\cdot\text{s})$	20

2.2 仿真计算模型

冲蚀磨损是指材料被流体介质携带固体颗粒以一定的速度或者角度冲击材料表面，出现磨损的现象<sup>[18-19]</sup>。冲蚀磨损一般用冲蚀磨损率表示，即固体颗粒冲刷材料造成的磨损速率。根据压控滑套中的流体流动情况、流体介质和滑套的材质，本文选用了适用于石英砂冲击碳钢表面的 DPM 模型<sup>[20-21]</sup>：

$$R_{\text{erosion}} = \sum_{p=1}^{N_{\text{particle}}} \frac{m_p C(d_p) f(\alpha) v^{b(v)}}{A_{\text{face}}} \quad (1)$$

式中： $R_{\text{erosion}}$  为冲蚀率； $N_{\text{particle}}$  为颗粒冲撞数目； $m_p$  为颗粒质量； $C(d_p)$  为颗粒直径函数，选取  $1.8 \times 10^{-9}$ ； $v$  为粒子相对于壁面的速度； $b(v)$  为粒子相对速度的函数，选取 2.6； $\alpha$  为粒子路径与壁面的冲击角度； $f(\alpha)$  为冲击角的函数，采用线性分段函数描述，当冲击角为  $0^\circ$ 、 $20^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $45^\circ$  和  $90^\circ$  时， $f(\alpha)$  分别取 0、0.8、1、0.5、0.4； $A_{\text{face}}$  为材料被颗粒撞击的面积<sup>[22-23]</sup>。

控制方程选用 N-S 方程组，湍流模型使用标准  $K-\epsilon$  模型，设置入口边界条件为速度入口（velocity inlet），出口边界定义为自由流出（outflow），设置入口流体和固体颗粒的速度、大小、方向相同。壁面选用 wall 壁面，在 DPM 模型中采用 reflect 类型，反弹系数<sup>[24-25]</sup>的定义如式(2)、(3)所示。

$$\epsilon_N = 0.993 - 0.0307\alpha_1 + 4.75 \times 10^{-4}\alpha_2 - 2.61 \times 10^{-6}\alpha_3 \quad (2)$$

$$\epsilon_T = 0.998 - 0.029\alpha_1 + 6.43 \times 10^{-4}\alpha_2 - 3.56 \times 10^{-6}\alpha_3 \quad (3)$$

式中， $\epsilon_N$  为法向反弹系数， $\epsilon_T$  为切向反弹系数。标准  $K-\epsilon$  方程如式(4)、(5)所示：

$$\frac{d\rho k}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_i}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k - \rho \epsilon \quad (4)$$

$$\frac{d(\rho \epsilon)}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_i}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right] + G_{1\epsilon} G_k \frac{\epsilon}{k} - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (5)$$

式中， $\epsilon$  为湍流耗散率（ $\text{m}^2/\text{s}^3$ ）； $k$  为湍流动能（J）； $\mu$  为动力黏度（ $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ）； $\mu_i$  为湍流黏度（ $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ）； $G_k$  为平均速度梯度引起的湍动能  $k$  的产生项， $\sigma_k=1$ ； $G_{1\epsilon}=1.44$ ， $C_{2\epsilon}=1.92$ ， $\sigma_\epsilon=1.3$ 。

3 结果及分析

3.1 冲蚀磨损位置及分析

为了分析压控滑套易冲蚀磨损位置，先设置钻井液中固体颗粒直径  $d=0.2 \text{ mm}$ ，密度为  $\rho=1500 \text{ kg/m}^3$ ，液体入口流速为  $10 \text{ m/s}$ ，黏度为  $20 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ 。经过数值模拟分析，压控滑套易冲蚀区域分布如图 5 所示。固体颗粒因为流体曳力的作用对滑套内部进行冲蚀，从图 5 中可以看出，易发生冲蚀区域主要有三处：滑套过流通道、封堵块面及内壁面。封堵块面处于滑套流体出口，受到流体颗粒的直接冲击，冲蚀最为严重，平均冲蚀率和最大冲蚀率都最大。流体颗粒冲击到封堵块平面后，会向两侧移动，内壁面的冲蚀也较为明显。由于流体通道骤缩，过流通道口冲蚀也很明显。

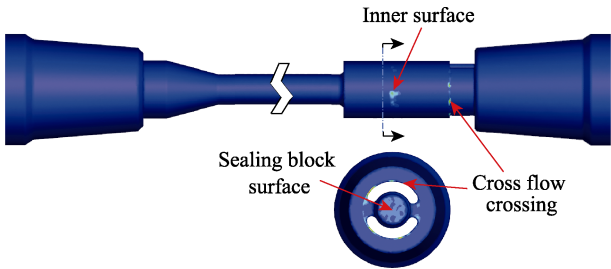


图 5 滑套冲蚀位置分布  
Fig.5 Erosion position distribution of sliding sleeve

3.2 颗粒粒径的影响

为了研究不同直径大小的颗粒对冲蚀磨损行为的影响，根据实际工况，选取颗粒直径分别为 0.1、0.3、0.4、0.5、0.6、0.7、0.8、0.9、1.1 mm。在相同的入口速度、质量流量、封堵块与滑套距离下进行数值模拟仿真，计算得到的颗粒直径与最大冲蚀率的关系如图 6 所示，图 7 所示为不同直径下的颗粒冲蚀面积云图。

从图 6 可以看出，随着颗粒直径的增加，压控滑套封堵块面、过流通道和内壁面的最大冲蚀磨损率都随之增加，粒径从 0.1 mm 增长到 1.1 mm 时，最大冲蚀率（取三个位置平均值）增大了 63.4 倍。但是在不同的直径区间下的颗粒增速不同：在  $d=0\sim0.3 \text{ mm}$  时，封堵块面、过流通道和内壁面的增速很慢，几乎



不发生变化；在  $d=0.3\sim 0.7$  mm 时，三个区域增速变快；在  $d>0.7$  mm 时，过流通道最大冲蚀率不随着颗粒直径的增加而增加，而封堵块面和内壁面的最大冲蚀率随着颗粒直径的增加而继续线性增加。根据图 7 的冲蚀面积云图可以发现，颗粒直径增大，压控滑套封堵块面、过流通道和内壁面的冲蚀面积也随之增加。由此可知，滑套在使用时，其颗粒直径越小越好，以小于 0.3 mm 为宜，超过 0.7 mm 后对滑套的冲蚀破坏加剧。

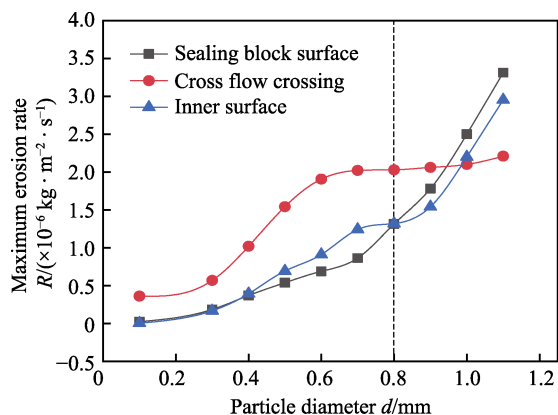


图 6 最大冲蚀率与颗粒直径的关系

Fig.6 Relationship between maximum erosion rate and particle diameter

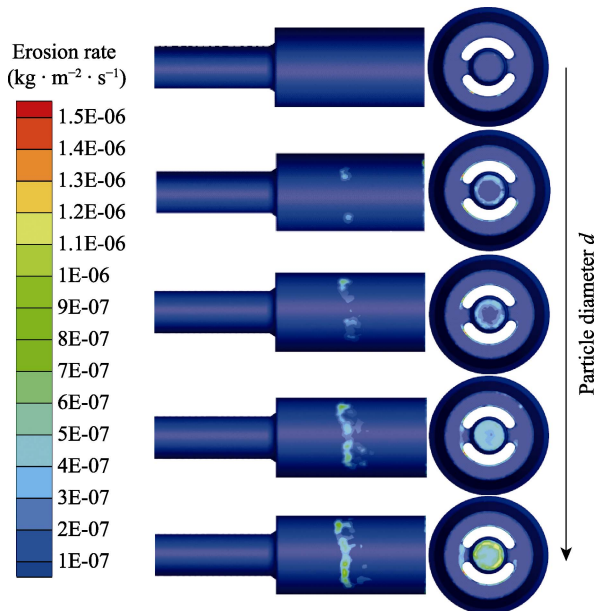


图 7 冲蚀面积与颗粒直径的关系

Fig.7 Relationship between erosion area and particle diameter

### 3.3 封堵块与滑套底端距离的影响

在其他环境因素一致的情况下，分析了封堵块与滑套底端之间距离的变化对滑套冲蚀情况的影响。滑套三个易冲蚀区域最大冲蚀率和冲蚀面积的变化情况如图 8、图 9 所示。当距离从 55 mm 降低到 5 mm 时，最大冲蚀率（三个位置平均值）增大了 3.8 倍。

随着距离增加，滑套过流通道处的最大冲蚀率有轻微降低，但是变化不明显。而滑套封堵块面和内壁面的冲蚀变化情况则可以分为三个阶段：在  $L=5\sim 15$  mm 时，随着距离增加，最大冲蚀率急剧下降；在  $L=15\sim 30$  mm 时，内壁面继续下降，不过降低速度减缓；而在  $L=30\sim 50$  mm 时，则趋于稳定，基本不发生变化，表示此时冲蚀情况不受距离影响。同时，从冲蚀面积云图（图 9）中可以看到，随着距离增加，内壁面的冲蚀面积显著减小，而封堵块面和过流通道则没有明显变化。故在进行设计时，应使得封堵块和滑套底端距离大于 30 mm，此时滑套各部位冲蚀磨损较小。

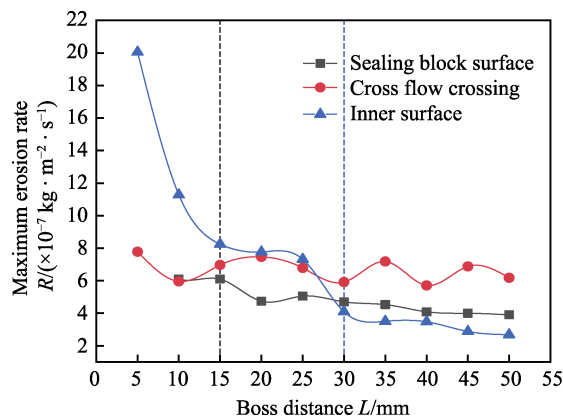


图 8 最大冲蚀率与封堵块到滑套距离的关系

Fig.8 Relationship between maximum erosion rate and distance between sealing block and sliding sleeve

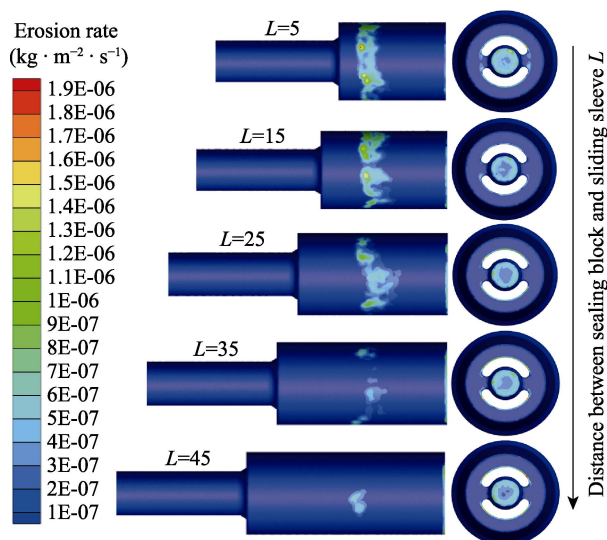


图 9 冲蚀面积与封堵块到滑套距离的关系

Fig.9 Relationship between erosion area and distance between sealing block and sliding sleeve

### 3.4 流体入口流速的影响

流速对滑套冲蚀影响巨大，设置速度分别为 6、8、10、12、14 m/s，保持颗粒直径、封堵块位置、质量流量等条件一致，得到不同流速下滑套的最大冲蚀率变化曲线（图 10）以及冲蚀云图（图 11）。

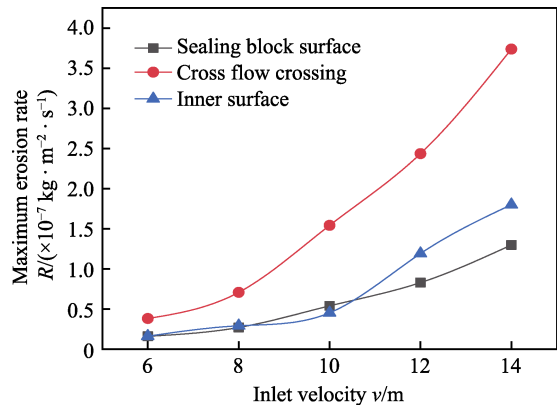


图 10 最大冲蚀率与入口流速的关系  
Fig.10 Relationship between maximum erosion rate and inlet velocity

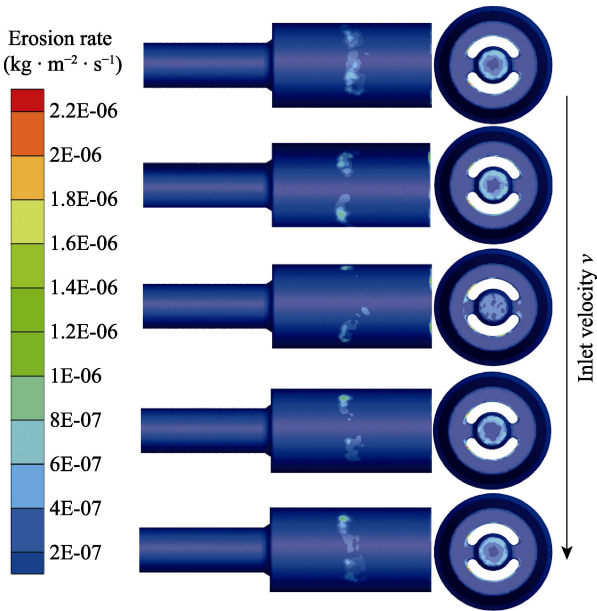


图 11 冲蚀面积与入口流速的关系  
Fig.11 Relationship between erosion area and inlet velocity

由图 10 可知，流速  $v$  变化对滑套三个易冲蚀区域的冲蚀影响较大，随着入口流速的增加，滑套易冲蚀区域的最大冲蚀率呈现指数增加趋势。这是因为流速越大，单位时间内固体颗粒冲击滑套表面的次数越多，颗粒携带的冲击动能越大，因此冲蚀率越来越大。入口速度由 6 m/s 增加到 14 m/s 时，最大冲蚀率（三个位置平均值）增大了 9.5 倍，而滑套易冲蚀区域的冲蚀面积没有显著变化，因此在压控滑套的使用过程中应该尽量控制入口流速较小。

3.5 质量流量的影响

质量流量是单位时间内流体流过滑套的流体质量，是体积流量和质量浓度的乘积。设置流速不变，改变质量流量大小，即分析不同的质量浓度对冲蚀结果的影响情况。设置质量流量分别为 0.001、0.002、0.003、0.004、0.005、0.006、0.007 kg/s，所得滑套

的三个易冲蚀区域最大冲蚀率变化情况和冲蚀云图如图 12、图 13 所示。

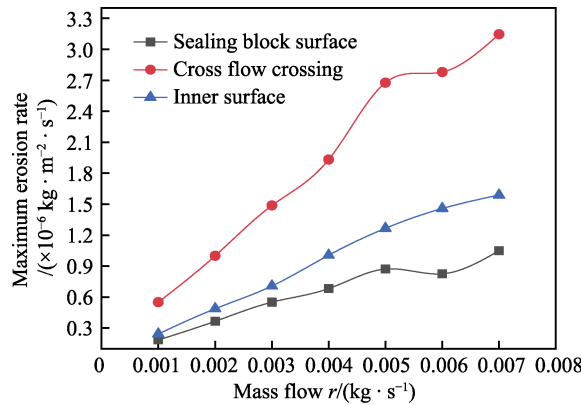


图 12 最大冲蚀率与质量流量的关系  
Fig.12 Relationship between maximum erosion rate and mass flow

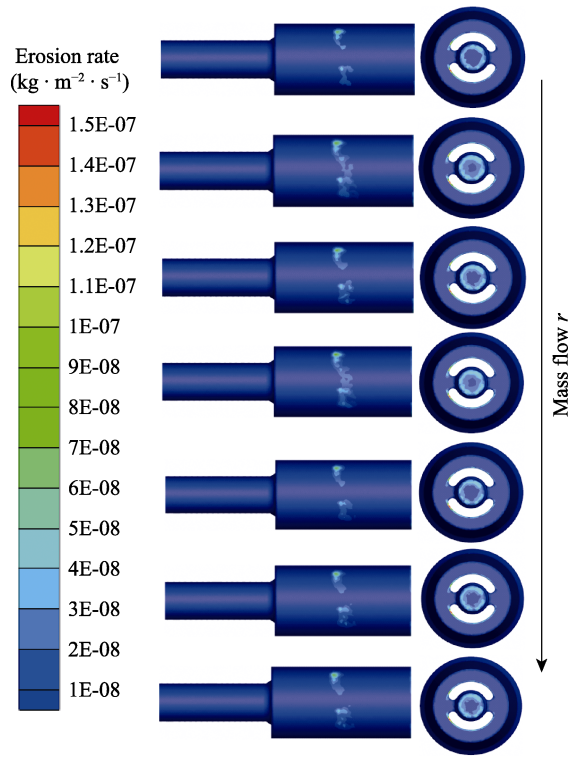


图 13 冲蚀面积与流体质量流量的关系  
Fig.13 Relationship between erosion area and fluid mass flow

如图可见，随着流体质量流量  $r$  的增大，压控滑套的三个易冲蚀区域的最大冲蚀率呈线性增加，流体质量流量由 0.001 kg/s 增加到 0.007 kg/s，最大冲蚀率增大了 5.6 倍。这是由于随着岩屑质量流量的增加，单位时间内进入滑套的固体颗粒数量增多，磨损加剧。而随着流体质量流量增大，压控滑套易冲蚀区域的冲蚀面积没有发生明显变化。因此，在保证钻井液其他要求的前提下，可以降低其质量浓度，达到降低冲蚀的目的。

## 4 结论

基于欧拉-拉格朗日算法的DPM冲蚀预测模型,对天然气水合物喷射破碎压控滑套进行了有效计算,研究了流固耦合作用下,滑套结构参数和钻井液物性参数对工具冲蚀的影响规律,得出以下结论:

1) 冲蚀颗粒进入滑套后,易冲蚀区域为封堵块面、过流通道和内壁面,在滑套直管段和上接头入口处产生的磨损较小。设计时应重点考虑和强化易冲蚀区域。

2) 滑套易冲蚀区域最大冲蚀率及冲蚀面积随着颗粒直径增大而增大,在流体颗粒粒径小于0.3 mm时,冲蚀情况较好。同时,粒径从0.1 mm变化到1.1 mm时,平均最大冲蚀率增长了63.4倍,超过其他影响因素,因此认为粒径是影响最大冲蚀率增长的主要因素。严格控制钻井液固体颗粒粒径大小,可以显著降低冲蚀情况。

3) 压控滑套中滑套和封堵块之间的距离对于封堵块面和内壁面的冲蚀情况影响较大,而对过流通道几乎没有影响。滑套和封堵块面距离大于30 mm后,距离改变对最大冲蚀率影响较低。

4) 流体入口流速和质量流量对滑套的冲蚀具有相似的影响规律,随着流体入口流速和质量流量的增大,滑套的最大冲蚀率线性增大,但易冲蚀区域的冲蚀面积变化不明显。

### 参考文献:

- [1] CHONG Z R, YANG S H B, BABU P, et al. Review of natural gas hydrates as an energy resource: Prospects and challenges[J]. Applied energy, 2016, 162: 1633-1652.
- [2] 周守为, 陈伟, 李清平. 深水浅层天然气水合物固态流化绿色开采技术[J]. 中国海上油气, 2014, 26(5): 1-7.  
ZHOU Shou-wei, CHEN Wei, LI Qing-ping. The green solid fluidization development principle of natural gas hydrate stored in shallow layers of deep water[J]. China offshore oil and gas, 2014, 26(5): 1-7.
- [3] 赵金洲, 周守为, 张烈辉, 等. 世界首个海洋天然气水合物固态流化开采大型物理模拟实验系统[J]. 天然气工业, 2017, 37(9): 15-22.  
ZHAO Jin-zhou, ZHOU Shou-wei, ZHANG Lie-hui, et al. The first global physical simulation experimental systems for the exploitation of marine natural gas hydrate through solid fluidization[J]. Natural gas industry, 2017, 37(9): 15-22.
- [4] 周守为, 赵金洲, 李清平, 等. 全球首次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 Shou-wei, ZHAO Jin-zhou, LI Qing-ping, 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.
- [5] 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技术[J]. 天然气工业, 2017, 37(12): 68-74.  
WANG Guo-rong, ZHONG Lin, ZHOU Shou-wei, et al. Jet breaking tools for natural gas hydrate exploitation and their support technologies[J]. Natural gas industry, 2017, 37(12): 68-74.
- [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 Guo-rong, HUANG Rong, ZHONG Lin, 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] TANG Yang, YAO Jia-xin, HE Yin, et al. Study on pressure-controlled sliding sleeve of jet breaking for natural gas hydrate mining based on throttle pressure drop principle[J]. Energy science & engineering, 2020, 8: 1-16.
- [8] 易先中, 彭灼, 周元华, 等. 高压压裂液对JY-50压裂弯管冲蚀行为影响的数值模拟[J]. 表面技术, 2019, 48(2): 144-151.  
YI Xian-zhong, PENG Zhuo, ZHOU Yuan-hua, et al. Numerical simulation for erosion behavior of high-pressure fracturing fluids on JY-50 fracturing bend pipe[J]. Surface technology, 2019, 48(2): 144-151.
- [9] 蒋硕硕, 吴玉国, 杨鸿麟, 等. 流线型孔板流量计液固两相流冲蚀磨损数值模拟[J]. 表面技术, 2018, 47(3): 153-158.  
JIANG Shuo-shuo, WU Yu-guo, YANG Hong-lin, et al. Numerical simulation of liquid/solid erosive wear of streamlined orifice plate flowmeter[J]. Surface technology, 2018, 47(3): 153-158.
- [10] HUANG Zhi-qiang, XIE Dou, HUANG Xiao-bing, et al. Analytical and experimental research on erosion wear law of drill pipe in gas drilling[J]. Engineering failure analysis, 2017, 79: 615-624.
- [11] 黄勇, 殷琨, 朱丽红. 反循环钻进中水龙头弯管磨损数值模拟[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(5): 2053-2059.  
HUANG Yong, YIN Kun, ZHU Li-hong, et al. Numerical simulation of swivel bend wear in reverse circulation drilling[J]. Journal of Central South University (science and technology), 2013, 44(5): 2053-2059.
- [12] WANG G R, CHU F, TAO S Y, et al. Optimization design for throttle valve of managed pressure drilling based on CFD erosion simulation and response surface methodology[J]. Wear, 2015, 338-339: 114-121.
- [13] JAFARI Akbar, DEGHANI Kamran, BAHAAADDINI Keyvan, et al. Experimental comparison of abrasive and erosive wear characteristics of four wear-resistant steels[J]. Wear, 2018, 416: 14-26.

(下转第270页)