

## 超深井变径连续管冲蚀磨损规律研究\*

刘少胡<sup>1,2</sup>, 徐泽庆<sup>1</sup>, 苑清英<sup>3,4</sup>, 杨 洋<sup>1</sup>, 李若雯<sup>1</sup>

(1. 长江大学 机械工程学院, 湖北 荆州 434023; 2. 长江大学油气钻采工程湖北省重点实验室, 武汉 430100; 3. 中油国家石油天然气管材工程技术研究中心有限公司, 西安 710018; 4. 西安石油大学 石油工程学院, 西安 710065)

**摘 要:** 针对超深井变径连续管的冲蚀问题, 基于冲蚀理论和固液两相流理论, 对变径连续管的井下水平段和滚筒缠绕段进行冲蚀模拟分析, 研究变径连续管不同壁厚和变壁厚段的冲蚀情况, 采用控制变量法研究排量、含砂比、颗粒直径以及颗粒密度对变径连续管的冲蚀影响规律。研究表明: 随着壁厚的减小, 变径连续管内壁的冲蚀逐渐减小, 变径段的冲蚀要比不变径段的冲蚀小, 而且滚筒缠绕螺旋段的冲蚀集中在连续管外侧。此外, 随着排量、含砂比、颗粒密度的增加, 最大冲蚀速率呈增大的趋势; 随着颗粒直径的增加, 最大冲蚀速率呈减小的趋势。研究结果对变径连续管的应用具有一定的指导作用。

**关键词:** 变径连续管; 冲蚀磨损; 数值模拟; 水力压裂; 超深井

**中图分类号:** TG115.58; TE931.2 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19291/j.cnki.1001-3938.2023.07.006

### Research on Erosion Law of Variable Diameter Coiled Tubing in Ultra Deep Wells

LIU Shaohu<sup>1,2</sup>, XU Zeqing<sup>1</sup>, YUAN Qingying<sup>3,4</sup>, YANG Yang<sup>1</sup>, LI Ruowen<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Yangtze University, Jingzhou 434023, Hubei, China; 2. Hubei Province Key Laboratory of Drilling and Production Engineering for Oil and Gas, Yangtze University, Wuhan 430100, China; 3. Chinese National Engineering Research Center for Petroleum and Natural Gas Tubular Goods Co., Ltd., Xi'an 710018, China; 4. College of Petroleum Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** Aiming at the erosion problem of variable diameter coiled tubing (CT) in service in ultra deep wells, based on the erosion theory and solid-liquid two-phase flow theory, the erosion simulation analysis of the horizontal section and drum winding section of variable diameter CT was carried out, and the erosion of variable diameter CT with different wall thickness and variable wall thickness section was studied. The Control variates was used to study the impact of displacement, sand content ratio, particle diameter and particle density on the erosion of variable diameter CT. Research shows that as the wall thickness decreases, the erosion of the inner wall of the variable diameter CT gradually decreases. The erosion of the variable diameter section is smaller than that of the non variable diameter section, and the erosion of the drum winding spiral section is concentrated on the outer side of the CT. In addition, with the increase of displacement, sand content ratio, and particle density, the maximum erosion rate shows an increasing trend. As the particle diameter increases, the maximum erosion rate shows a decreasing trend. The research results have certain guiding significance for the application of variable diameter CT.

**Key words:** variable diameter CT; erosion and wear; numerical simulation; fracking; ultra deep well

## 0 前 言

连续管技术是石油天然气勘探开发中一项蓬

勃发展的技术, 在世界范围内已经广泛应用于洗井、钻井、修井、射孔及增产等多个领域<sup>[1]</sup>, 随着油气开发向深井、超深井领域不断发展, 为了

\* 基金项目: 国家自然科学基金项目“连续管缺陷处细观—宏观损伤失效机制研究”(项目编号51974036); 湖北省高等学校优秀中青年科技创新团队计划项目“连续管智能控制与安全评定”(项目编号T2021035)。

减少连续管的重量,变径连续管的应用尤为重要。变径连续管应用于压裂作业中,压裂液携带固体颗粒高速通过连续管时会对连续管的内壁造成严重的冲蚀磨损,甚至引起连续管失效及井下事故<sup>[2-3]</sup>。

近年来,国内外学者针对连续管冲蚀规律做了大量研究。Subhash等<sup>[4]</sup>采用试验和CFD模拟相结合的方法,对滚筒缠绕部分连续管螺旋段的冲蚀磨损进行了研究。Rosine等<sup>[5]</sup>采用CFD的方法对连续管进行冲蚀分析,表明CFD方法能有效确定连续管冲蚀严重、需要检查的位置。鄢标等<sup>[6]</sup>研究了压裂液对螺旋段连续管冲蚀磨损的机理,采用控制变量法研究了质量浓度、流量、颗粒直径等对连续管冲蚀的影响。刘少胡等<sup>[7]</sup>对含缺陷连续管内壁冲蚀进行研究,分析了缺陷数量、缺陷形状(深度、长度、宽度)对连续管内壁的冲蚀影响。张益维<sup>[8]</sup>对连续管螺旋段内壁、连续管屈曲段外壁,以及含缺陷连续管进行了冲蚀分析,并结合剩余寿命预测模型,对连续管的冲蚀磨损规律进行了研究。吴晗等<sup>[9]</sup>对比研究了含焊肉直连续管、360°弯曲连续管、正弦弯曲连续管等的内壁冲蚀磨损规律。Cao等<sup>[10]</sup>以 $\Phi 60.3 \text{ mm} \times 4.8 \text{ mm}$  CT90连续管为研究对象,分析了质量流量、颗粒流量、颗粒直径等敏感因素对连续管冲蚀特性的影响。曹银萍等<sup>[11]</sup>针对连续管发生螺旋屈曲时管体内壁的冲蚀情况进行了研究,并利用灰色关联法对连续管冲蚀的仿真数据进行了分析。

目前对于连续管的冲蚀研究较多,但大多是内径一致的连续管,对于变径连续管的冲蚀研究还没有相关研究成果。本研究基于变径连续管,对连续管的水平段和滚筒缠绕螺旋段的冲蚀磨损进行研究,并分析了流体排量、含砂比、颗粒直径和颗粒密度对变径连续管的冲蚀磨损影响规律。

## 1 数值模拟模型

### 1.1 连续相控制方程

在流体流动中需要遵守能量守恒定律,其中基本控制方程包括质量守恒方程、动量守恒方程和能量守恒方程<sup>[12]</sup>。

质量守恒方程为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho u_z)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

式中:  $u_x$ 、 $u_y$ 、 $u_z$ —— $x$ 、 $y$ 、 $z$ 三个方向的速度分量, m/s;

$t$ ——时间, s;

$\rho$ ——流体密度,  $\text{kg/m}^3$ 。

$x$ 、 $y$ 、 $z$ 三个方向的动量守恒方程为

$$\frac{\partial(\rho u_x)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u_x \vec{u}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + \rho f_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho u_y)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u_y \vec{u}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + \rho f_y \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho u_z)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u_z \vec{u}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \rho f_z \quad (4)$$

式中:  $p$ ——流体微元体上的压强, Pa;

$\tau_{xx}$ 、 $\tau_{yy}$ 、 $\tau_{zz}$ ——分子粘性作用在微元体表面上的粘性应力 $\tau$ 的分量, Pa;

$f_x$ 、 $f_y$ 、 $f_z$ ——三个方向的单位质量力,  $\text{m/s}^2$ 。

能量守恒方程为

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot [\vec{u}(\rho E + p)] = \nabla \cdot [k_{\text{eff}} \nabla T - \sum_j h_j J_j + (\tau_{\text{eff}} \cdot \vec{u})] + S_h \quad (5)$$

式中:  $E$ ——流体微团的总能, J/kg, 包含内能、动能和势能之和;

$h_j$ ——组分 $j$ 的焓, J/kg;

$k_{\text{eff}}$ ——有效热传导系数,  $\text{W/(m} \cdot \text{K)}$ ;

$j_j$ ——组分 $j$ 的扩散通量;

$S_h$ ——化学反应热及其它用户定义的体积热源项。

### 1.2 DPM 离散相模型

采用拉格朗日方法来计算粒子轨迹,忽略粒子间的碰撞。其运动受力方程为<sup>[13]</sup>

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + \frac{g(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F \quad (6)$$

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_p D^2} \frac{C_c \text{Re}}{24} \quad (7)$$

$$Re = \frac{\rho D |u_p - u|}{\mu} \quad (8)$$

式中： $u_p$ ——粒子速度，m/s；

$u$ ——液体速度，m/s；

$F_D(u-u_p)$ ——单个粒子所受到的阻力，N；

$\rho$ ——流体密度，kg/m<sup>3</sup>；

$\mu$ ——流动黏性系数；

$D$ ——颗粒直径，mm；

$Re$ ——雷诺数；

$\rho_p$ ——颗粒密度，kg/m<sup>3</sup>。

### 1.3 湍流模型

选择RNG  $k-\varepsilon$  湍流模型<sup>[14]</sup>对变径连续管冲蚀机理进行研究，其湍动能 $k$ 及耗散率 $\varepsilon$ 的控制方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \alpha_k \mu \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_m + S_k \quad (9)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \alpha_\varepsilon \mu \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_1 \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_3 G_b) - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon + S_\varepsilon \quad (10)$$

式中： $\rho$ ——密度，kg/m<sup>3</sup>；

$k$ ——单位质量的湍流动能，J；

$\alpha_k$ ——湍流动能对应的普朗特数；

$u_i$ ——在 $i$ 方向上的速度，m/s；

$\mu$ ——动力黏度，Pa·s；

$x_i, x_j$ ——空间坐标分量，m；

$G_k$ ——平均速度梯度引起的湍流动能的产生项；

$G_b$ ——上升引起的湍流动能的产生项；

$\varepsilon$ ——单位质量湍流动能耗散率，m<sup>2</sup>/s<sup>3</sup>；

$Y_m$ ——可压缩湍流膨胀对总耗散率的影响；

$\alpha_\varepsilon$ ——对应湍流动能耗散率的普朗特数；

$S_k, S_\varepsilon$ ——用户定义的源项。

其中， $C_1=1.42$ 、 $C_2=1.68$ 、 $C_3=1.3$ 。

### 1.4 冲蚀理论模型

冲蚀模型采用 Fluent 软件自带的通用 (Generic) 模型<sup>[15]</sup>，其冲蚀速率定义为

$$V_{\text{erosion}} = \sum_{n=1}^N \frac{m_p C(D_p) f(\theta) u_p^{b(v)}}{A} \quad (11)$$

式中： $V_{\text{erosion}}$ ——弯管壁面的冲蚀速率，kg/(m<sup>2</sup>·s)；

$N$ ——注入的总颗粒数；

$m_p$ ——颗粒的质量流量，kg/s；

$C(D_p)$ ——颗粒直径函数，取 $1.8 \times 10^{-9}$ ；

$\theta$ ——颗粒与壁面的冲击角，(°)；

$f(\theta)$ ——冲击角函数，采用分段线性方式进行定义( $\theta=0^\circ$ 、 $20^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$ ， $f(\theta)=0$ 、 $0.8$ 、 $1$ 、 $0.5$ 、 $0.4$ )；

$u_p$ ——颗粒相对于壁面的速度，m/s；

$b(v)$ ——相对速度的函数，取 $2.6$ ；

$A$ ——壁面面积，m<sup>2</sup>。

## 2 几何模型建立及边界条件

### 2.1 几何模型的建立

变径连续管水力压裂作业中，流体由滚筒主轴流入缠绕在滚筒上的连续管内部，依次经过注入头、垂直段、造斜段、水平段和井下作业工具。流体在连续管内高速流动，对连续管内壁造成严重冲蚀磨损。本研究就变径连续管在井下水平段和滚筒缠绕段的冲蚀情况进行研究，变径连续管的结构如图1所示，其外径为50.8 mm，壁厚在变化，相关尺寸见表1。

以连续管的变径段为研究对象，对模型进行简化，流体从大壁厚小内径流入，从小壁厚大内径流出，在变径水平段选取20 m建立水平段的冲蚀模型，在滚筒（直径为2 032 mm）缠绕变径螺旋段选取1个螺距进行分析，建立螺旋段的冲蚀模型。

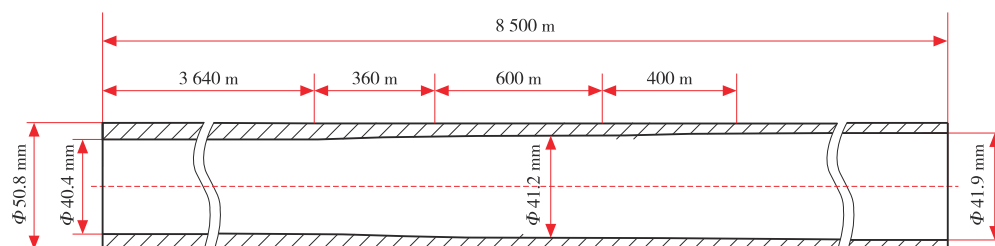
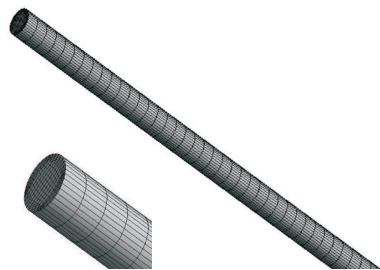


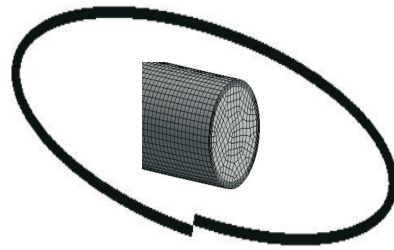
图1 变径连续管几何模型

表1 变径连续管尺寸

| 壁厚/mm      | 长度/m  |
|------------|-------|
| 5.2        | 3 640 |
| 5.2 ~ 4.8  | 360   |
| 4.8        | 600   |
| 4.8 ~ 4.45 | 400   |
| 4.45       | 3 500 |



(a) 水平段网格划分



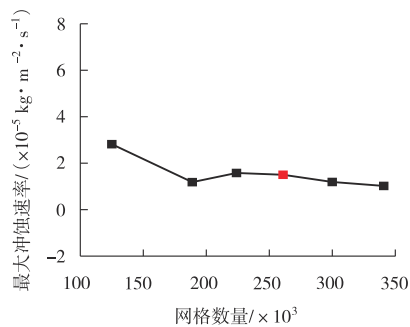
(b) 螺旋段网格划分

图2 连续管水平段和螺旋段的网格划分

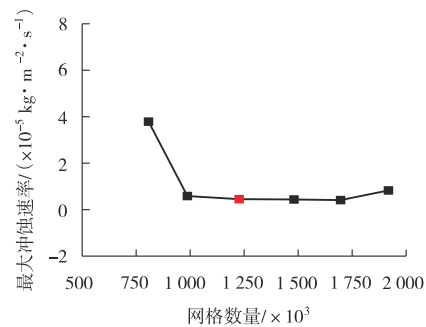
### 2.3 网格无关性验证

在冲蚀模拟分析中, 网格数量会对计算精度和计算速度影响, 以最大冲蚀速率作为网格无关性验证的评判指标, 对变径水平段和

变径螺旋段进行网格无关性验证, 如图3所示。变径水平段选取26万左右网格数量, 变径螺旋段选取120万左右的网格数量进行模拟计算。



(a) 水平段



(b) 螺旋段

图3 网格无关性验证

## 3 变径连续管冲蚀分析及影响规律

### 3.1 变径连续管水平段冲蚀影响分析

当高速流体中含有固体颗粒时, 流体和颗粒的双重作用对连续管造成更严重的冲蚀磨损, 以变径连续管井下水平段为研究对象, 对不同壁厚的变径连续管段每段选取20 m, 在不改变其他条件的情况下, 研究压裂液对变径连续管内壁的冲蚀情况, 图4是第一段变

径段(5.2 ~ 4.8 mm 变壁厚段) 井下水平段的冲蚀磨损云图。

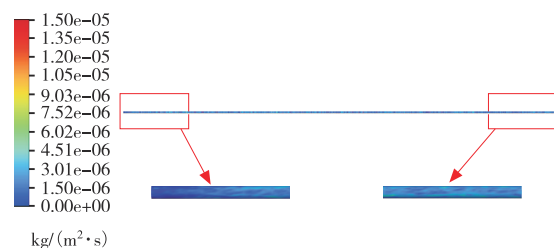


图4 变径水平段冲蚀磨损云图



图5为变径连续管不同壁厚时的冲蚀速率,可以看出,3个不变径连续管随着壁厚的减小冲蚀速率也减小,这是因为在变径连续管外径不变的情况下壁厚减小内径变大,同时在排量不变的情况下内径变大流体速度变小,所以冲蚀速率减小,而且第一段变径段(5.2~4.8 mm 变壁厚段)比第二段变径段(4.8~4.45 mm 变壁厚段)的壁厚大,冲蚀也更严重一些。从图5中还可以看出,变径段的冲蚀要比不变径段的冲蚀小,这是因为变径段壁厚在逐渐减小,而内径在变大,所以其冲蚀会比不变径段的冲蚀小一些。

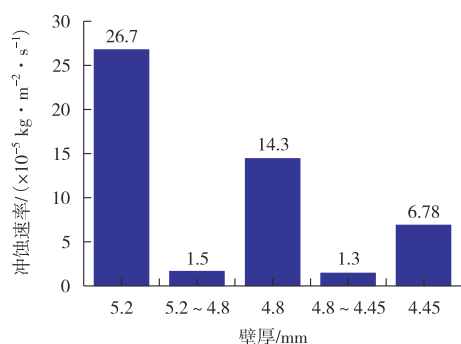


图5 不同壁厚时变径连续管冲蚀速率对比

### 3.2 变径连续管螺旋段冲蚀影响分析

以变径连续管滚筒缠绕段为研究对象,对不同壁厚的变径连续管段每段选取一个螺距,在不改变其他条件的情况下,研究压裂液对变径连续管内壁的冲蚀情况。图6是第一段变径段螺旋段的冲蚀磨损云图,可以看出,冲蚀集中在变径连续管内壁的外侧。

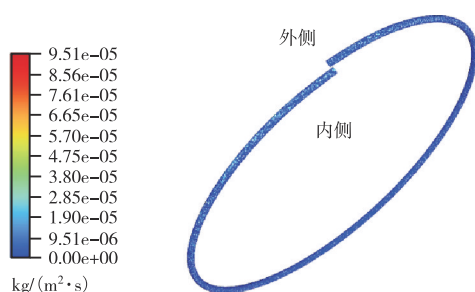


图6 变径螺旋段冲蚀磨损云图

图7为变径连续管不同螺旋段的冲蚀速率,可以看出,随着壁厚的减小、内径的增加,冲蚀速率也相应减小,并且在入口直径一样的情况下,变壁厚段的冲蚀要比不变壁厚的冲蚀小。

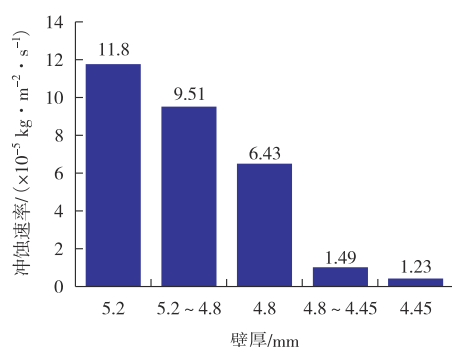


图7 变径连续管不同螺旋段冲蚀速率对比

### 3.3 排量对变径水平段的冲蚀影响

研究排量对变径水平段的冲蚀规律,压裂液排量的取值范围为0.8~1.6 m³/min,计算得到的水平段变径连续管的最大冲蚀速率、平均冲蚀速率、最大速度和平均速度,如图8所示。从图8可以看出,随着压裂液排量的逐渐增大,冲蚀速率和速度都呈增大的趋势。当排量为0.8 m³/min时,变径连续管内壁的最大冲蚀速率比较小,值为 $1.05 \times 10^{-5} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ;当排量增加到1.6 m³/min时,最大冲蚀速率的值为 $2.2 \times 10^{-5} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,是排量为0.8 m³/min时最大冲蚀速率的2.1倍。这其中的原因是,随着排量的增加,压裂液的速度增加,对壁面的冲击力加大,所以冲蚀速率和速度都呈增大的趋势。

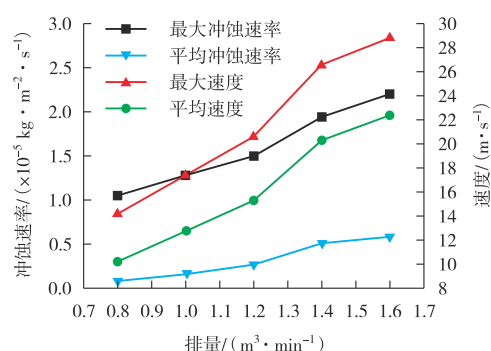


图8 排量对变径水平段的冲蚀影响

### 3.4 含砂比对变径水平段的冲蚀影响

研究含砂比对变径水平段的冲蚀规律,压裂液含砂比取值范围为1%~5%,计算得到的水平段变径连续管最大冲蚀速率、平均冲蚀速率、最大速度和平均速度,如图9所示。从图9可以看出,随着压裂液含砂比的增大,最大冲蚀速率和平均冲蚀速率都呈增大的趋势,

最大速度和平均速度的值基本不变。当压裂液含砂比为1%时,变径连续管内壁的最大冲蚀速率较小,其值为 $1.5 \times 10^{-5} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ;当压裂液含砂比增加到5%时,最大冲蚀速率的值为 $7.45 \times 10^{-5} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,是含砂比为1%时最大冲蚀速率的4.97倍。其原因是,含砂比越大,颗粒数量越多,变径连续管内壁受到的碰撞次数越多,所以最大冲蚀速率和平均冲蚀速率都呈增大的趋势。

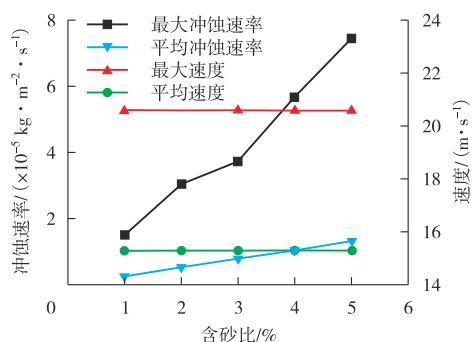


图9 含砂比对变径水平段的冲蚀影响

### 3.5 颗粒直径对变径水平段的冲蚀影响

研究颗粒直径对变径水平段的冲蚀规律,颗粒直径取值范围为0.395~0.795 mm,计算得到水平段变径连续管最大冲蚀速率、平均冲蚀速率、最大速度和平均速度,如图10所示。从图10可以看出,随着颗粒直径的增大,最大冲蚀速率和平均冲蚀速率都呈减小的趋势,最大速度和平均速度的值不变。当颗粒直径为0.395 mm时,变径连续管内壁的最大冲蚀速率值较大,其值为 $3.11 \times 10^{-5} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ;当颗粒直径增加到0.795 mm时,最大冲蚀速率的值为 $6.7 \times 10^{-6} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,大约是颗粒直径为0.395 mm时最大冲蚀速率的1/5。其原因是,颗粒直径越大,颗粒质量流率和颗粒密

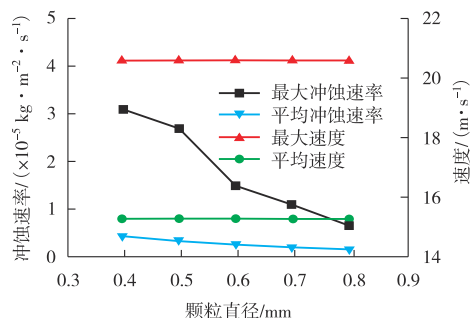


图10 颗粒直径对变径水平段的冲蚀影响

度不变时,颗粒的数目会减少,单位时间内与管壁碰撞的颗粒减少,故最大冲蚀速率会减小。

### 3.6 颗粒密度对变径水平段的冲蚀影响

研究颗粒密度对变径水平段的冲蚀规律,颗粒密度取值范围为1 600~3 600  $\text{kg}/\text{m}^3$ ,计算得到水平段变径连续管最大冲蚀速率、平均冲蚀速率、最大速度和平均速度,如图11所示。由图11可知,随着颗粒密度的逐渐增大,最大冲蚀速率和平均冲蚀速率都呈增大的趋势,最大速度和平均速度的值不变。当颗粒密度为1 600  $\text{kg}/\text{m}^3$ 时,变径连续管内壁的最大冲蚀速率较小,其值为 $5.84 \times 10^{-6} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ;当颗粒密度增加到3 600  $\text{kg}/\text{m}^3$ 时,最大冲蚀速率的值为 $4.8 \times 10^{-5} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,是颗粒密度为1 600  $\text{kg}/\text{m}^3$ 时最大冲蚀速率的8.22倍。其原因是,颗粒密度越大,颗粒质量流率和颗粒直径不变时,颗粒的数目会变多,对壁面的冲击也就越大,故最大冲蚀速率会增加。

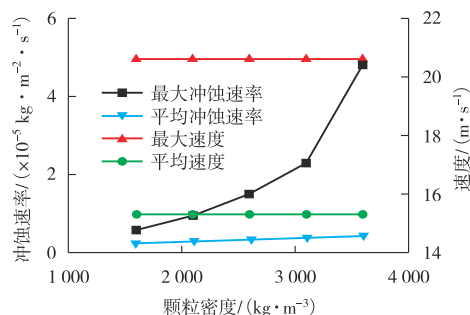


图11 颗粒密度对变径水平段的冲蚀影响

## 4 结 论

(1) 在井下水平段,随着变径连续管的壁厚减小、内径增加,连续管内壁受到的冲蚀磨损增加,而且变径段的冲蚀磨损要比不变径段的冲蚀小。

(2) 在滚筒缠绕段,冲蚀磨损主要发生在变径连续管内壁的外侧。在入口直径一样的情况下,变径段冲蚀要比不变径段的冲蚀小,而且随着壁厚的减小,冲蚀也随之减小。

(3) 随着排量、含砂比和颗粒密度的增大,最大冲蚀速率增加;随着颗粒直径的增大,最大冲蚀速率减小。

(下转第70页)