

文章编号: 1000-8241(2012)06-0466-04

# 水膜发生器的研制及流场分析

徐丽<sup>1</sup> 马文鑫<sup>2</sup> 申龙涉<sup>2</sup> 王玉福<sup>2</sup> 霍珊<sup>3</sup>

1. 沈阳理工大学机械工程学院, 辽宁沈阳 110159; 2. 辽宁石油化工大学石油天然气工程学院, 辽宁抚顺 113001;  
3. 中国石油抚顺石化公司石油三厂, 辽宁抚顺 113001

徐丽等. 水膜发生器的研制及流场分析. 油气储运, 2012, 31(6): 466-469.

**摘要:** 水膜发生器是超稠油水膜面减阻技术中使管道内形成环状水膜的流体机械设备, 其内部流场需要长期保持稳定, 以形成稳定的水膜。在设计水膜发生器时, 使高压水流射入后通过一个厚度为 1 mm 的穿孔板再形成水膜, 穿孔板部分区域不开孔, 其余部位均匀开孔, 以控制水流动能和速度, 进而控制水膜厚度。高效渗透筛管的选择决定水膜面的稳定性, 其关键在于确定穿孔板的开孔率和开孔直径。运用 ANSYS 软件对水膜发生器的强度进行分析, 以确定其应力集中部位并进行加强处理, 使用材料为 X52 的管线钢制作水膜发生器可以满足实际运行条件的要求。运用 Fluent 软件对水膜发生器内部流场进行模拟, 以确定水膜发生器的合理长度和开孔直径, 优化运行参数。

**关键词:** 水膜发生器; 水膜面; 超稠油; 流场; 数值模拟

**中图分类号:** TE869

**文献标识码:** A

**doi:** 10.6047/j.issn.1000-8241.2012.06.017

两种互不相容液体之间的密度相近, 但粘度差别却非常大。输送高粘度液体时, 使低粘度液体(如水)在管壁和高粘度核心流(如超稠油)之间形成环状润滑液膜, 在一定的操作条件下, 两种流体在管内形成同心液环, 低粘度流体液膜靠近管壁, 从而避免因超稠油与管壁直接接触而导致较高的压力损失<sup>[1]</sup>。Bensakhria 等设计的水膜发生器, 当稠油通过水平管段时, 利用环形注射方式引进水流, 而 Hasson 等设计的水膜发生器形状对称, 可以在很大程度上限制管道壁面附近低粘度流体的流动区域, 降低入口流体的湍流程度<sup>[2]</sup>。基于在辽河油田进行超稠油水膜面减阻技术中型试验(架空试验管道长度 200 m, 规格  $\phi 57 \times 3.5$ ) 的成功经验, 借鉴国外水膜发生器的相关技术, 开展新型高效水膜发生器的研究设计, 研制产品即将应用于  $\phi 406 \times 8$  实际运行管道中。

## 1 结构设计

### 1.1 水膜形成机理

高压水流通过注水口射入后为湍流模式, 各个方向速度均不稳定, 不易形成稳定水膜。因此, 在设计水膜发生器时, 使高压水流射入后通过一个厚度为 1 mm

的穿孔板再形成水膜, 穿孔板均匀开孔, 可以很好地控制入流速度; 与水流入口垂直的板(穿孔板)上留有一定面积不开孔(图 1), 使高速水流直接射到未开孔的钢板上以控制水流动能。通过 Fluent 仿真软件对水膜发生器内部流场进行模拟, 确定水膜发生器的合理长度和开孔直径。通过控制水流入口压力、速度, 可以控制水膜发生器形成水膜的厚度。

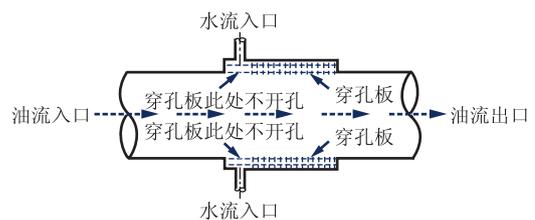


图 1 水膜发生器结构示意图

### 1.2 渗透筛管的选择

将孔径为 1 mm 的不锈钢穿孔板制作成圆柱形水膜面渗透筛管(图 2, 开孔率为 15%), 其作用是使垂直方向的水流均匀而平稳地注入输油管道, 而水流通过筛管的渗透速度是水膜形成的关键因素。



图 2 水膜面渗透筛管示意图

## 2 强度计算

根据水膜发生器的结构特点,以壳单元建立全模型,利用 Structural Shell Elastic 4node63 单元进行计算,设置其常数为 10 mm。由于水膜发生器筒体两端连接其它构件,近似认为两端可以保持圆形截面形状,为此约束环向位移;在两端约束轴向位移,向筒体内表面施加压力,压力值为 10 MPa。利用有限元软件 ANSYS 对水膜发生器进行应力分析,得到此时的应力云图(图 3),可知筒体两端的连接过渡处内表面为危险面,其最大应力强度值为 30.801 MPa,远远小于 X52 管线钢的屈服极限值。以 X52 管线钢为材料的水膜发生器最大承受压力可达 32.9 MPa,当管道运行压力为 6 MPa 时,可以保证安全运行。同时,根据 ANSYS 软件的模拟结果(图 3),管壁开孔处(红色区域)应力集中,应进行加强处理<sup>[3-4]</sup>。

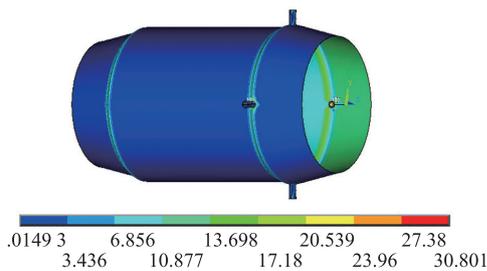


图 3 水膜发生器 ANSYS 应力分布云图

## 3 内部流场分析

### 3.1 数学模型

运用 Gambit 建立三维模型并进行网格划分(图 4)。由于水膜面形成后环绕在油心的周围,在壁面和油心之间形成薄膜,为了捕捉界面的流体学数据,划分网格时使用边界层网格进行处理,同时增大环状区域的网格密度。

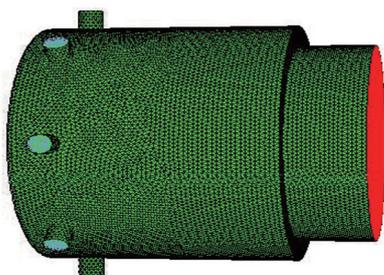


图 4 水膜发生器内部流场三维模型网格划分

基于 VOF 模型建立水膜发生器内部流场的连续

性方程、动量方程、 $\kappa$  方程、 $\varepsilon$  方程。为了便于对控制方程进行分析,以及利用同一程序求解各控制方程,设通用变量  $\phi$ , 则各控制方程均可表示为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \text{div}(\rho u\phi) = \text{div}(\Gamma_{\phi} \nabla \phi) + S$$

式中:各项自左向右依次为瞬态项、对流项、扩散项和源项,其中: $\rho$  为流体密度; $u$  为速度矢量。对于特定方程, $\phi$ 、 $\Gamma$ 、 $S$  具有特定的形式(表 1,其中: $u_i$  为  $i$  方向的速度分量; $\mu$  为应力张量; $p$  为静压; $S_i$  为包含了其它的模型相关源项,如多孔介质和自定义源项)。

表 1 水膜发生器内部流场通用方程中各符号的具体形式

方程	$\phi$	$\Gamma$	$S$
连续性方程	1	0	0
动量方程	$u_i$	$\mu$	$-\partial p/\partial x_i + S_i$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho\kappa)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\kappa u_i)}{\partial x_i} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_i}{\alpha_{\kappa}} \right) \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \right] \\ &+ G_{\kappa} + G_b - \rho\varepsilon - Y_M + S_{\kappa} \\ \frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\varepsilon u_i)}{\partial x_i} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_i}{\alpha_{\varepsilon}} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] \\ &+ C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{K} (G_{\kappa} + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{K} + S_{\varepsilon} \\ \mu_i &= \rho C_{\mu} \frac{\kappa^2}{\varepsilon} \end{aligned}$$

式中: $\kappa$  为湍动能; $t$  为时间; $\varepsilon$  为耗散率; $x_i$  为  $i$  方向; $x_j$  为  $j$  方向; $G_{\kappa}$  为由平均速度梯度引起的湍动能产生项; $G_b$  为由浮力引起的湍动能产生项; $Y_M$  为可压缩湍流中脉动扩张的贡献; $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$  和  $C_{3\varepsilon}$  为经验常数; $\alpha_{\kappa}$ 、 $\alpha_{\varepsilon}$  分别为与  $\kappa$  和  $\varepsilon$  对应的 Prandtl 数; $S_{\kappa}$  和  $S_{\varepsilon}$  为用户定义的源项<sup>[5]</sup>; $\mu_i$  为湍流粘度; $C_{\mu}$  为常数。

水膜发生器的渗透筛管由厚度为 0.001 m 的不锈钢穿孔板制成,使用 Fluent 对其进行运算处理时可以应用多孔介质模型。因不锈钢穿孔板很薄,建立模型时使用表面区域而不是单元区域,故形成的多孔介质一维化简模型被称为多孔跳跃,可用于模拟具有已知速度、压降特征的薄膜。多孔介质的动量方程具有附加的动量源项,其由两部分组成,即粘性损失项和惯性损失项:

$$S_i = \frac{\mu}{\alpha} v + \frac{1}{2} C_2 \rho |v_j| v_j$$

式中: $\alpha$  为渗透率; $C_2$  为内部阻力因子; $\mu$  为液体粘度, Pa·s; $v_i$  为  $i$  方向的速度分量, m/s; $v_j$  为  $j$  方向的速度分量, m/s。通过多孔介质的液体为水,其粘度较低,穿

孔板很薄,因此忽略粘性损失项,只考虑惯性损失项<sup>[6]</sup>。

### 3.2 边界条件与初始条件

水膜发生器在初始条件下充满水,流动从稠油入口开始。油和水两相液流均为速度入口,油流入口速度 0.8 m/s,水流入口速度 1 m/s。出口压力 101 325 Pa,两液体的表面张力 0.3 N/m。考虑  $y$  方向重力因素,其值为  $-9.8 \text{ m/s}$ 。超稠油密度为  $0.996 \text{ kg/m}^3$ ,粘度为  $2.5 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 。不锈钢穿孔板的开孔率为 15%,假设水流通过穿孔板的压降是水头压力的 0.5 倍,可以通过下式计算惯性损失项中适当的  $C_2$  值。

$$\Delta p = 0.5 K_1 \rho v_{15\%}^2$$

式中: $\Delta p$  为压降, Pa; $K_1$  为压降损失因数; $\rho$  为流体密度,  $\text{kg/m}^3$ ; $v_{15\%}^2$  为液体通过开孔率为 15% 穿孔板后的速度,  $\text{m/s}$ 。

在 Fluent 模型中,水流通过穿孔板的速度假定为 100% 开孔率下的速度,惯性损失系数必须转化为多孔区域的动压头损失<sup>[6]</sup>,计算出在 15% 开孔率下,  $C_2=25\ 000$ 。

### 3.3 结果与分析

采用非稳态模型对水膜发生器形成水膜的情况进行模拟,计算时间控制在 3 600 s,并且结果已经收敛。观察水膜面的形成情况(图 5a,红色代表油相,蓝色代表水相),在运行时间内油相体积分数图像变化基本保持稳定,油水混合区域出现锯齿波的主要原因是:在网格划分过程中使用了边界层网格,靠近壁面区域网格划分密集,而水膜发生器内部核心区域网格划分较为稀疏。因此,含水率稍有变化,水相的体积分数图像变化幅度即非常明显,但依然可见壁面附近水膜面的稳定形成。由水流入口中心截面图(图 5b)可知,因水流垂直注入到没有开孔的不锈钢板上,故油水界面清晰。在这里定义  $x=0.4 \text{ m}$  时为水膜发生器出口,  $x=0.6 \text{ m}$  时为该模型出口。由水膜发生器出口和模型出口的截面图(图 5c、图 5d)可知,水膜发生器出口处的水膜面厚度大于模型出口的水膜面厚度。

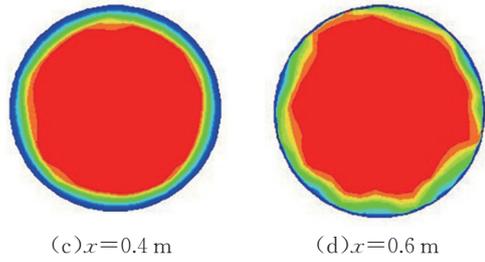
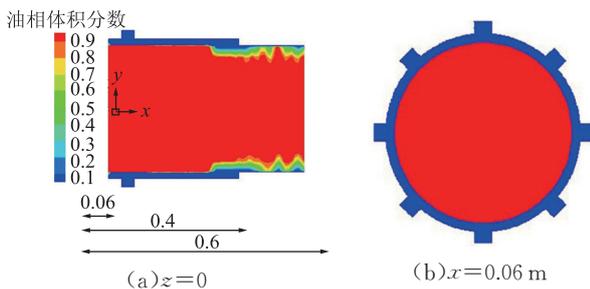


图 5 水膜面形成后油相的体积分数

对水膜发生器的内部速度场进行分析(图 6a,油流入口速度为 0.8 m/s,对应浅黄色区域),水膜面形成以后,水流在水膜发生器及管道轴心位置的速度较大。水流入口速度为 1 m/s,垂直注入到没有开孔的不锈钢板上。水膜面渗透筛管外侧为水相区域,约在轴向  $x=0.14$  处筛网外侧的水流速度减小至趋于稳定。由此可以推断,在设计水膜发生器时,适当减小其轴向长度不会影响水膜面的稳定形成。筛管外环区域基本为浅绿色(图 6b),表明水膜发生器设计 8 个入水口时得到的径向速度较为理想,筛管内侧由于超稠油的高粘性使边界层附近的速度梯度变化明显。根据水膜发生器出口和模型出口的速度梯度云图(图 6c、图 6d),水流速度在径向上逐渐变化,最高速度在管的中心位置,并沿径向逐渐减小,至壁面接近于 0。

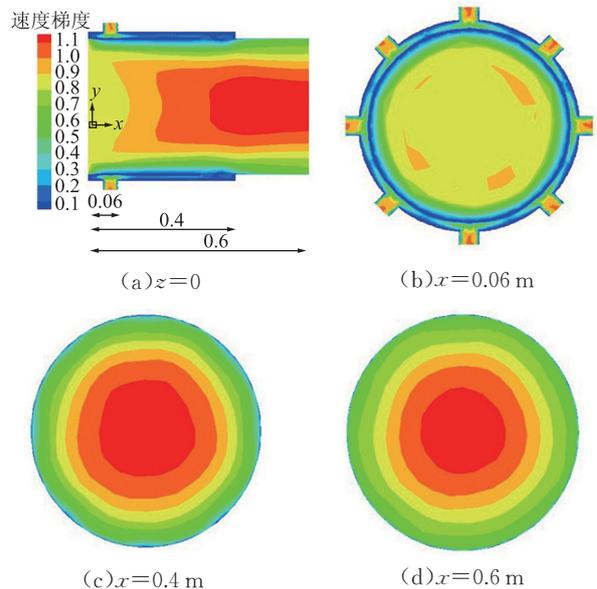


图 6 水膜面形成后的速度梯度

## 4 结论

研究设计了一种水膜发生器,其使水流垂直入射至水平管道上,并在管道上套加渗透筛管,外管走水,

内管走油。根据 Fluent 软件的模拟结果,可以适当减小水膜面渗透筛管的轴向长度,但需保留穿孔板上一定面积为不开孔区域,以保证在筛管外得到稳定的水流速度场。根据强度计算结果,使用材料为 X52 的管线钢制作水膜发生器完全可以满足实际运行工况条件的要求。根据 ANSYS 软件的模拟分析结果,水膜发生器外壁面开孔处应进行加强处理。综上分析,该水膜发生器可以应用于实际运行管道中,并能够获得稳定的环状水膜面。

### 参考文献:

- [1] Joseph D D, Bai R, Chen K R, et al. Core-annular flows[J]. Fluid Mech, 1997, 29: 1-30.
- [2] Bannwart A C. Modeling aspects of oil-water core-annular flows[J]. Petroleum Science and Engineering, 2001, 32: 127-143.
- [3] Bensakhria A, Peysson Y, Antonini G. Experimental study of the pipeline lubrication of heavy oil transport[J]. Oil Gas Sci

Technol-Rev, 2004, 59(5): 523-133.

- [4] Ghosh S, Mandal T K, Das G, et al. Review of oil water core annular flow[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009, 13: 1 957-1 965.
- [5] Ghosh S, Gargi Das, Prasanta Kumar Das. Simulation of core annular down flow through CFD-A comprehensive study[J]. Chem Chemical Engineering and Processing, 2010, 49: 1 222-1 228.
- [6] Flunetn Inc. Fluent 6.3 help[EB/OL]. 2006-9-29[2011-06-06]. <http://my.fit.edu/itresources/manuals/fluent6.3/help/pdf/ug/pdf.htm>.

(收稿日期:2011-07-22;编辑:关中原)

(上接第 465 页)

封堵皮碗的密封面是一个斜平面,进入管道后,密封面的整个平面都受力,但因受管道椭圆度影响而受力不均,整个密封面上会产生褶皱造成泄漏(图 7)。若将原来的斜面密封改成 5 层圆弧凸起(图 8),相当于在密封时,有 5 个独立的 O 形环在密封,保证封堵可靠性的同时,省时省力。

$\phi 1016$  管道多采用直焊缝管,其内壁上凸起的直焊缝使密封面产生凹槽,皮碗无法与焊缝紧密贴合而造成泄漏。若在与焊缝对应的皮碗表面处打磨相应的凹槽(图 9),使焊缝凸起紧密贴合在凹槽内,可消除漏点,提高密封的可靠性。此外,密封皮碗的材质与抗压强度也是影响密封效果的关键,需进一步研究与试验,以提高设备本身的可靠性。

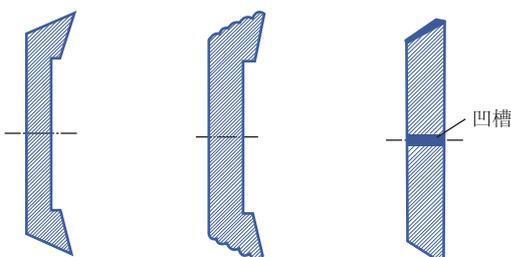


图 7 皮碗 图 8 改进皮碗 1 图 9 改进皮碗 2

## 5 结束语

盘式封堵器承受压力大,密封可靠,原理简单,在

**作者简介:**徐丽,讲师,1971 年生,2003 年毕业于长春理工学院机电工程专业,现主要从事动力机械设计与数值模拟工作。

电话:13940512690;Email:xxllbox@163.com

管道不停输封堵中得到广泛应用,盘式封堵技术也已相当成熟。但盘式封堵器设备本身存在的一些不足,会对管道造成损伤,设备的可靠性可能影响工程进度甚至直接关系到封堵成功与否,因此设备本身的可靠性需要进一步提升,以提高封堵效率,减少工作量。

此外,盘式封堵仍然受到压力和管径的限制,提升封堵密封适用压力和适用管径,扩展不停输封堵技术的应用范围,在中、高压管道的更新、改造、抢修等方面得到广泛应用是盘式封堵技术今后的发展趋势。

### 参考文献:

- [1] 周卫军,郭瑞,张勇,等.不停输带压开孔封堵技术的应用[J].管道技术与设备,2009(6):12-14.
- [2] 刘建强,勾绘.盘式封堵技术[J].油气田地面工程,2003,22(10):12-16.
- [3] 王敬凡.不停输封堵技术的应用[J].城市公用事业,2006,20(3):32-34.
- [4] 丁明东,曹崇珍,王富才,等. SY/T6150-2003 钢制管道封堵技术规范[S].北京:石油工业出版社,2003.

(收稿日期:2011-08-19;编辑:潘红丽)

**作者简介:**陈瑞,助理工程师,1987 年生,2009 年毕业于中国石油大学(华东)电气工程及其自动化专业,现主要从事石油天然气管道维修技术工作。

电话:18997718485;Email:xbgdc@petrochina.com.cn