

# 深井中旋转减振器结构设计及流场分析

庄 未, 王亲猛

(北京工业大学 机械工程与应用电子技术学院, 北京 100022)

**摘 要:** 采用 ANSYS/CFX 对减振器在深井工作时的流场, 尤其对心轴颈部处的流场进行了数值模拟计算, 得到了壁面剪切应力与钻井液黏性系数的关系. 数值模拟结果表明, 在设计减振器结构时, 选择合理的颈部过渡圆角, 可以有效地调整流场特性, 避免裂纹的产生.

**关键词:** 石油钻井; 减振器; 流体流动; 数值模拟

**中图分类号:** O 357.5

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0254-0037(2006)增刊-0083-04

目前, 深井旋转减振器作为主要国产产品之一<sup>[1]</sup>, 已经打入国际市场. 但在深井中作业时, 减振器经常在颈部处出现裂纹现象, 甚至发生断裂事故. 为了提高产品的性能, 有必要对裂纹原因作进一步分析, 以便采取改进措施. 在深井下减振器的工作环境非常恶劣, 钻井液与井底岩屑形成的流体对减振器产生冲刷, 同时形成的复杂流场会加剧减振器的振动, 因此, 研究减振器周围的流场特性及其影响可以探讨改进减振器结构设计的途径<sup>[2]</sup>. 作者采用 ANSYS/CFX 对深井中旋转减振器处流场进行了数值模拟分析, 并对 2 种不同颈部结构的减振器的流场特性进行了对比分析.

## 1 减振器结构

减振器是石油钻井井下工具之一, 通过内部减振元件减小和吸收来自于钻头和钻柱的冲击和震动的能量, 保护钻头和钻柱, 延长其使用寿命. 其下接头与钻头相连, 上接头与钻铤相连. 钻井时, 钻井液从钻杆、钻铤中间流向钻头的喷嘴, 冲刷和清洗井底岩屑, 然后从钻铤、钻杆与井壁之间的环空返回地面. 由于钻头结构非常复杂, 且减振器颈部处流场距离井底流场较远, 所以在模拟时忽略钻头喷嘴对流场的影响.

## 2 物理模型建立

采用 ANSYS/CFX 分析减振器在工作条件下的流场, 分别考虑减振器心轴颈部处的不同结构 (见图 1), 改进后的结构颈部为 2 个反向弧度过渡连接. 根据旋转射流<sup>[3-4]</sup>的结构特点, 对流体域作如下假设: 1) 整个流体域为静止域, 水眼中的射流流动为稳定流动, 液体不可压缩, 介质为钻井液, 忽略温度及浮力的影响. 2) 减振器体 (除颈部处) 直径 159 mm, 心轴颈部直径 113 mm. 3) 减振器体与井壁间的环形空间均匀, 流体从减振器水眼另一侧垂直射流撞击井底, 其距离为 40 mm, 井底为光滑的平井底.

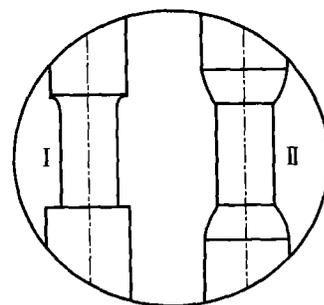


图 1 减振器结构

Fig. 1 Structure of the shock absorber

收稿日期: 2006-05-10.

作者简介: 庄 未(1977-), 女, 黑龙江大庆人, 硕士生.

### 3 控制方程

整个流场分析采用  $k-\epsilon$  湍流模型.

连续性方程

$$\partial \rho / \partial t + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U}) = 0 \quad (1)$$

$N-S$  运动方程

$$\partial(\rho \mathbf{U}) / \partial t + \nabla \cdot \{\rho \mathbf{U} \otimes \mathbf{U}\} = \nabla \cdot \{-p \delta + \mu [\nabla \mathbf{U} + (\nabla \mathbf{U})^T]\} + \mathbf{S}_m \quad (2)$$

将式(2)中运动方程中的速度  $\mathbf{U}$  分成时均量  $\bar{\mathbf{U}}$  和随时间变化量  $\mathbf{u}$ , 即

$$\mathbf{U} = \bar{\mathbf{U}} + \mathbf{u} \quad (3)$$

其中

$$\bar{\mathbf{U}} = \frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} \mathbf{U} dt$$

将  $\bar{\mathbf{U}}$  代入式(2), 得到新的运动方程

$$\partial(\rho \mathbf{U}) / \partial t + \nabla \cdot \{\rho \mathbf{U} \otimes \mathbf{U}\} = \nabla \cdot (\boldsymbol{\tau} - \rho \overline{\mathbf{u} \otimes \mathbf{u}}) + \mathbf{S}_m \quad (4)$$

式中  $\rho \overline{\mathbf{u} \otimes \mathbf{u}}$  是雷诺应力, 即

$$-\rho \overline{\mathbf{u} \otimes \mathbf{u}} = -2\rho k \delta / 3 - (2/3)\mu_t \nabla \cdot (\mathbf{U} \delta) + \mu_t [\nabla \mathbf{U} + (\nabla \mathbf{U})^T] \quad (5)$$

其中,  $\mu_t$  是湍流黏性系数,  $\mu_t = C_\mu \rho k^2 / \epsilon$ ,  $C_\mu = 0.09$ . 为求解未知量  $\mu_t$ , 采用  $k-\epsilon$  双方程湍流模型将其封闭.

$k$  方程为

$$\partial(\rho k) / \partial t + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} k) = \nabla \cdot [(\mu + \mu_t / \sigma_k) \nabla k] + P_k - \rho \epsilon \quad (6)$$

$\epsilon$  方程为

$$\partial(\rho \epsilon) / \partial t + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \epsilon) = \nabla \cdot [(\mu + \mu_t / \sigma_\epsilon) \nabla \epsilon] + (\epsilon / k)(C_{\epsilon_1} P_k - C_{\epsilon_2} \rho \epsilon) \quad (7)$$

方程中涉及的经验常数<sup>[5]</sup>取值为:  $C_{\epsilon_1} = 1.44$ ,  $C_{\epsilon_2} = 1.92$ ,  $\sigma_k = 1.0$ ,  $\sigma_\epsilon = 1.3$ .

## 4 流体域有限元模型

### 4.1 网格的划分

采用抽出减振器后的流体域模型, 靠近井壁的单元采用六面体单元, 其他区域采用四面体单元, 整个流体域的单元数近 140 万个, 节点数近 46 万个.

### 4.2 边界条件

根据所建立的物理模型, 主要有入口条件、出口条件和壁面条件.

入口是距离减振器颈部较近一侧沿  $x$  方向的中心水眼. 假设入口流速是均匀、相等的, 可以得到入口的边界条件为  $U_x = u_0 = 20 \text{ m/s}$ ,  $U_y = 0$ ,  $U_z = 0$ .

出口相对压力为  $p_0 = 0$ , 考虑到整个流体域处于井下 4 km 处, 受到液柱压力的影响, 故设置域参考压力为 40.1 MPa.

壁面条件可以根据工作状态确定. 井壁以及井底为固定壁, 减振器以  $\omega = 400 \text{ r/min}$  的转速旋转, 可得到井底与井壁的壁面为无滑移条件, 即  $U_w = 0$ . 减振器表面的壁面选为旋转壁面且无滑移,  $U_w = \omega R$ .

## 5 计算结果与分析

### 5.1 流场特性

从图 2(a)可以看出, 减振器工作时整体流场除颈部区域和井底区域外, 其他区域均呈现层流结构. 从

图 2(b)可看出,井底流场可划分为射流区、漫流区、漩涡区和上返区.一部分流体被旋转射流卷吸入,重新流入以射流为主体的流向井底的冲击流中,形成很强的涡漩.井底流场距减振器颈部较远,因此,对颈部处的流场影响较小.另外,减振器的旋转带动钻井液运动,在离心力与柯氏力的作用下,流体速度呈现出明显的旋转特性,如图 2(c)所示.

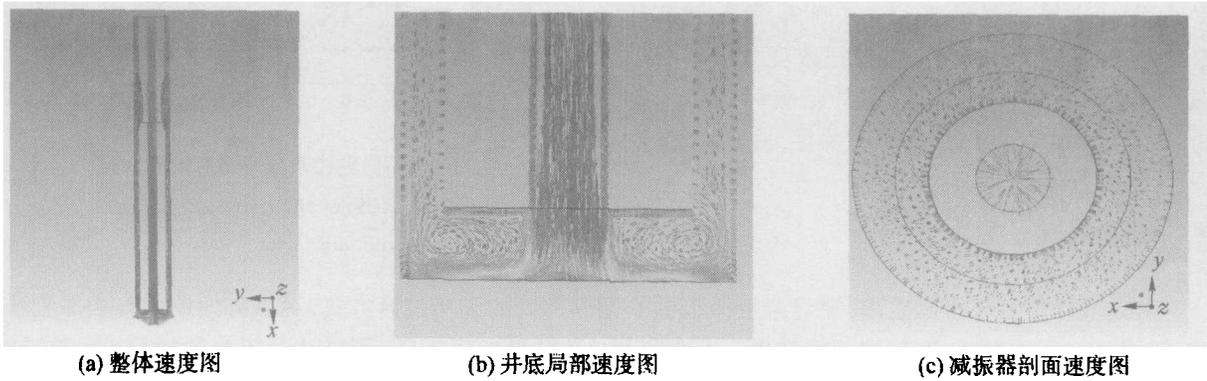


图 2 流体速度矢量图  
Fig.2 Velocity vector of fluid

### 5.2 颈部局部流场特性

为了更好地了解减振器颈部改进前后的流场变化,对其进行布点,如图 3(a)和 4(a)所示.其中 4~14 的位置在改进前后保持一致.

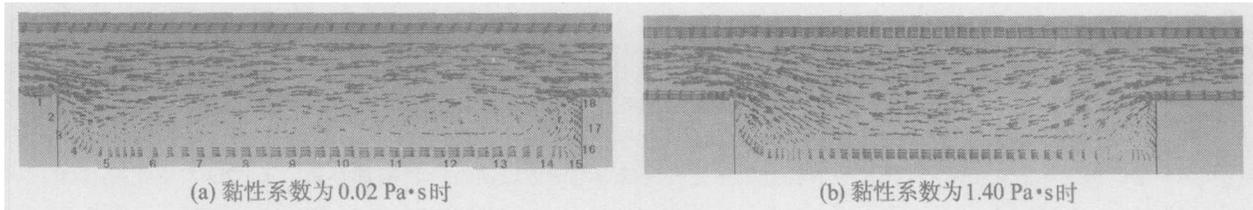


图 3 结构 I 颈部流体速度矢量图  
Fig.3 Velocity vector of the neck area of structure I

#### 5.2.1 黏度影响

从图 3(a)可以看出,流体流过颈部并在中间区域形成较大漩涡,中间的剪切力高于两端.随着黏性系数的增大,壁面剪切力也增大.从图 3(b)可以看出,漩涡逐渐向两端移动,两端的剪切力增加,而中间的剪切力降低.沿着流体流动方向,靠近出口漩涡处的剪切力高于远离出口漩涡处的剪切力.在黏性系数达到 1.4 Pa·s 时,部分流体自井底上返后,在心轴颈部环空处两直角端形成漩涡,携带岩屑的流体将不断冲刷这个区域,容易导致该部位产生裂纹.

以减振器颈部的布点位置  $x$  为横坐标,不同黏性系数条件下的壁面剪切力与 0.02 Pa·s 时的剪切应力之比  $\gamma$  为纵坐标,可以得到壁面剪切力  $\tau_w$  与黏性系数的关系,如图 5 所示.从图中可以看出,剪切应力随着黏性系数增加而增加.

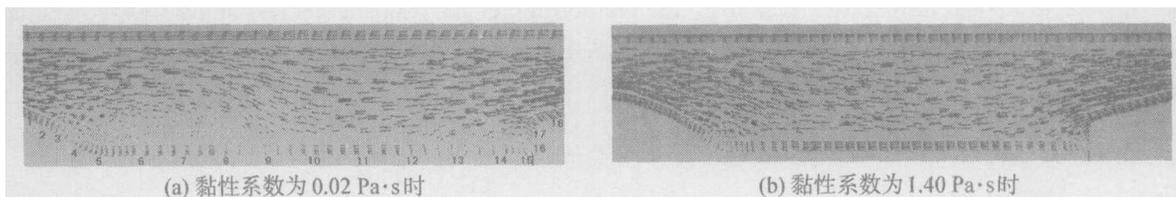


图 4 结构 II 颈部流体速度矢量图  
Fig.4 Velocity vector of the neck area of structure II

### 5.2.2 结构形状影响

当颈部处流场漩涡较强时,强漩涡会增加减振器的横向振动,同时导致磨料磨损和冲蚀磨损等表面磨损<sup>[2]</sup>,产生裂纹甚至疲劳断裂.比较图3和图4可以发现,图4中减振器颈部有过渡圆角,因此颈部环空处没有漩涡存在.由此看来,通过改变减振器心轴颈部处的结构设计,能达到削弱甚至破坏旋涡区的目的,减小或消除岩屑对该部位的冲蚀,避免裂纹产生.

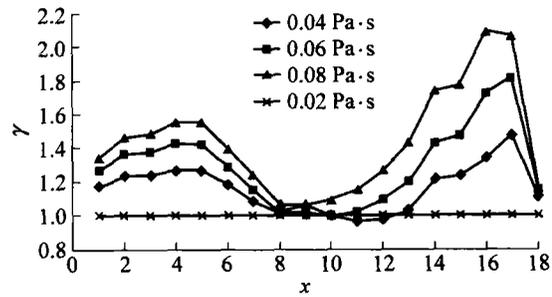


图5 不同黏性系数下的剪切应力比

Fig.5 Ratio of shear stress of different viscosity factor

## 6 结论

由数值计算结果可以看出,通过改变减振器心轴颈部处的连接过渡方式,可以有效地调整局部流场特性,削弱并破坏漩涡区,避免裂纹的产生.适当加大过渡圆弧曲率半径,可以达到更好的效果.另外,计算结果表明,钻井液的黏性系数对壁面剪切力有一定影响,可以选择适当的钻井液降低壁面剪切力,提高减振器的工作性能.

### 参考文献:

- [1] 张阳春, 杨志康, 郭东. 国内外石油钻采设备技术水平分析[M]. 北京: 石油工业出版社, 2001.
- [2] 李鹤林, 冯耀荣. 石油钻柱失效分析及预防措施[J]. 石油机械, 1990, 18(8): 38-44.  
LI He-lin, FENG Yao-rong. Failure analysis and protective measures for oil drill strings[J]. Petroleum Machinery, 1990, 18(8): 38-44. (in Chinese)
- [3] 王瑞和, 沈忠厚. 锥形旋转射流井底流场的数值模拟[J]. 石油大学学报(自然科学版), 1998, 22(6): 46-49.  
WANG Rui-he, SHEN Zhong-hou. Numerical simulation of swirling jet in flow field at bottomhole[J]. Journal of the University of Petroleum(Natural Science), 1998, 22(6): 46-49. (in Chinese)
- [4] 谢翠丽, 杨爱玲, 陈康民. 旋转钻头射流方式对井底流场影响的数值剖析[J]. 石油钻采工艺, 2002, 24(3): 1-4.  
XIE Cui-li, YANG Ai-ling, CHEN Kang-min. Numerical analysis on the influence of jet-flow types on bottomhole flowing field of rotary bit[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2002, 24(3): 1-4. (in Chinese)
- [5] 张远君, 王平. 流体力学大全[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1991: 178-182.

## Structural Design and Flow Field Analysis of Rotating Shock Absorbers in Deep Well Drills

ZHUANG Wei, WANG Qin-meng

(College of Mechanical Engineering and Applied Electronics Technology,  
Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

**Abstract:** ANSYS/CFX was adopted to analyze the rotating flow field around the rotating shock absorbers, especially the flow field near to the neck area, the relationship of the wall shear stress and viscosity parameters of drilling fluid was been obtained. As a result, reasonable round angle can be designed to adjust flow pattern effectively and the crack can be avoided.

**Key words:** oil well drills; shock absorbers; flow of fluids; numerical simulation