

文章编号: 0253-2697(2015)06-0754-06 DOI:10.7623/syxb201506013

控压钻井节流阀液-固两相流冲蚀预测及验证

王国荣¹ 楚飞¹ 陶思宇¹ 朱颢² 张敏¹ 陈宝康¹ 周然¹ 刘鹏¹

(1. 西南石油大学机电工程学院 四川成都 610500; 2. 中国石油化工集团石油工程机械有限公司 湖北武汉 430205)

摘要:运用欧拉-拉格朗日法和离散相模型,预测了节流阀内部粒子运动和分布规律,利用半经验冲蚀模型求解了颗粒对阀芯的冲蚀率,并设计相关实验验证了数值模拟的准确性。结果表明,数值模拟能够较为精确地预测节流阀阀芯的冲蚀轮廓;5 h以内的预测冲蚀损失量与实验数据贴合度很高,5 h以后的预测数据经合理修正后与实验结果相近,随冲蚀时间增长,预测误差逐渐减小,最终达到1%以下;该模型能够用于预测控压钻井节流阀复杂流场的冲蚀,有望为控压钻井节流阀的进一步优化设计提供参考。

关键词:控压钻井节流阀;液-固两相流;离散相模型;冲蚀预测;实验

中图分类号:TE98

文献标识码:A

Prediction and verification on liquid-solid two-phase flow erosion of managed pressure drilling throttle valve

Wang Guorong¹ Chu Fei¹ Tao Siyu¹ Zhu Hao² Zhang Min¹ Chen Baokang¹ Zhou Ran¹ Liu Peng¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Southwest Petroleum University, Sichuan Chengdu 610500, China;

2. Sinopec Petroleum Machinery Company, Hubei Wuhan 430205, China)

Abstract: The Eulerian-Lagrangian model and discrete phase model are used to predict the internal particle movement and distribution law of throttle valve. The semi-empirical erosion model is applied to calculate the erosion rate of grain on valve spool. Meanwhile, relevant experiments have been designed to validate the accuracy of numerical simulation. Results show that the erosion profile of throttle valve spool can be predicted more precisely with the use of numerical simulation. The predicted erosion loss within five hours has a high consistency with experimental data, while that after five hours is close to the experiment results through reasonable correction. With the extension of erosion time, the prediction error will decrease gradually, eventually less than 1%. This method can be applied to predict the erosion of complex flow field in managed pressure drilling throttle valve, thus providing a reference for further optimization of the throttle valve.

Key words: managed pressure drilling throttle valve; solid-liquid two-phase flow; discrete phase model; erosion prediction; experiment

引用:王国荣,楚飞,陶思宇,朱颢,张敏,陈宝康,周然,刘鹏.控压钻井节流阀液-固两相流冲蚀预测及验证[J].石油学报,2015,36(6):754-759.

Cite: Wang Guorong, Chu Fei, Tao Siyu, Zhu Hao, Zhang Min, Chen Baokang, Zhou Ran, Liu Peng. Prediction and verification on liquid-solid two-phase flow erosion of managed pressure drilling throttle valve[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(6): 754-759.

控制压力钻井技术(Managed Pressure Drilling, MPD)是近年来发展起来的,应用先进的井控设备和方法实现钻井最优化的一种工艺技术。MPD技术能够有效解决深层油气资源开采过程中常遇到的压力衰减、窄密度窗口、高温高压、高渗透裂缝性油藏等原因造成的井涌、井漏、有害气体泄漏、卡钻、起下钻时间过长等复杂钻井问题^[1],能够大幅度提高钻井速度、缩短钻井周期,使钻井作业更安全^[2,3]。控压钻井节流阀作为控压钻井装备中最为重要的设备之一,通过改变

阀芯开度有效控制节流阀进、出口之间的压差,从而达到精确控制井底压力的目的。节流阀阀芯表面与钻井液直接接触,钻井泥浆中的加重剂、岩屑等固相颗粒对节流阀表面有一定的冲蚀作用,特别在节流阀小开度工作时(约20%),钻井液流过节流阀的速度可达每秒几十米,固相颗粒剧烈破坏节流阀阀芯,使节流阀的控压特性下降,甚至造成阀芯破坏,不得不暂停钻井作业更换阀芯^[4],严重影响钻井效率和钻井安全。因此,在节流阀的设计和制造过程中,提高节流阀的抗冲蚀能

基金项目:国家重大科技专项(2011ZX05048-04HZ)和西南石油大学机电学院研究生创新基金(CX2014SY33)资助。

第一作者:王国荣,男,1977年9月生,1998年获西南石油学院学士学位,2004年获西南石油大学博士学位,现为西南石油大学机电工程学院教授,主要从事岩石破碎学、钻头、机械系统动力学和计算机仿真等方面的研究工作。Email:swpi2002@163.com

通信作者:楚飞,男,1989年3月生,2013年获中国石油大学(北京)学士学位,现为西南石油大学硕士研究生,主要从事石油井控设备的研究工作。Email:chufeii02@163.com

力越发显得重要。

目前提高节流阀抗冲蚀能力的做法主要有:多级降压以降低单级节流阀的压降从而降低过流速度;选择更耐冲蚀的材料或者表面改性技术^[5,6]。通过优化节流阀的结构提高节流阀自身的抗冲蚀能力显然是最为经济和有效的方法。然而,对于节流阀内部颗粒运动规律的研究不足,严重制约了高耐冲蚀性控压钻井节流阀的研发。

1 冲蚀研究方法

长期以来探索固体颗粒的冲蚀规律主要基于实验研究^[7-9],高速摄像机^[10]、光纤探针^[11]被用于探测内部流场,这种方法耗时长、资金消耗大,且内部流场变化、沙粒的速度、压力分布等均无法精确捕捉和描述,同时存在探测设备干扰流场的问题。这些因素是优化控压钻井节流阀结构,提高节流阀抗冲蚀能力的关键。因此,获得阀腔内部精确可靠的相关参数必然能够加快控压钻井节流阀的发展,有利于推广控压钻井节流技术。

计算流体动力学(CFD)的快速发展为控压钻井节流阀的冲蚀研究提供了一种新的、更加经济有效的方法。Wallance^[12]使用商业软件 FLUENT 研究了笼套式节流阀在气-固两相流的冲蚀磨损规律,Mazur^[13]研究了固体颗粒对蒸汽轮机的冲蚀特性,其中 Wallance 关于冲蚀轮廓的 CFD 仿真结果与试验数据具有很好的贴合度,并解决了冲蚀质量损失预测稍大的问题。

CFD 方法研究液-固两相流的冲蚀也得到了一定的发展。Chong Y. Wong^[14]对带孔平板进行了研究,使用坐标测量仪测量了冲蚀深度并与冲蚀预测进行了对比,验证了预测模型的可行性;黄勇^[15]等对某化工厂丁烯-1 装置中一段三通管道的壁面冲蚀损耗进行了计算,并证明了该模拟的正确性;周兆民^[16]仿真分析了高压管汇的冲蚀磨损,与实验进行对比证明了仿真分析的可靠性。然而,CFD 应用于复杂几何体,尤其是复杂流场液-固两相流相关物理量计算和冲蚀分析的研究较少。本文采用欧拉-拉格朗日法、离散相模型和半经验冲蚀模型对控压钻井节流阀阀腔流场进行了探索,预测了冲蚀发生的位置和冲蚀量,并实验验证了仿真的有效性,为节流阀冲蚀磨损过程及机理的研究提供新的方法,为优化设计提供了参考。

2 计算模型

欧拉-拉格朗日法进行冲蚀预测主要包括以下 3 个部分:①利用黏性或无黏模型预测流场;②运用离散相模型追踪粒子;③确定材料损失模型。模拟过程中涉及的模型如下:

2.1 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型

湍流是高雷诺数流体中观察到的非稳态三维随机运动,理论上 Navier-Stokes 方程依然适用于湍流,然而大多数情况下直接数值计算的时间和空间广度远超出计算机的运算能力。目前解决这个问题的最常用方法是 Reynolds 平均法,通过求解时均化 Reynolds 方程(RANS)来模拟湍流流动,工程实践证明这种方法具有很好的效果。涡黏模型是处理 RANS 方程中引入的 Reynolds 应力项的一种有效方法,其中最基本和应用广泛的是标准 $k-\epsilon$ 。它是在湍动能 k 方程的基础上,引入关于湍流耗散率 ϵ 的方程而形成的。因其稳定、经济和可靠的计算精度被广泛应用在工程流体和传热分析中。但是标准 $k-\epsilon$ 的方程推导假设流体是充分发展的湍流,忽略了分子黏性的影响,所以标准 $k-\epsilon$ 方程只适用于高雷诺数湍流模型。

针对标准 $k-\epsilon$ 模型用于强旋流或带有弯曲壁面的流动时会出现失真,应用统计学原理“重正化群”推导了 RNG $k-\epsilon$ 模型。RNG $k-\epsilon$ 模型的运输方程为:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \mu_{\text{eff}} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_\epsilon \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} - R_\epsilon + S_\epsilon \quad (2)$$

式中: ρ 为液体密度, kg/m^3 ; k 为湍动能, m^2/s^2 ; t 为时间, s ; u_i 为时均速度, m/s ; x_i, x_j 为位移 x 的张量指标形式, i, j 取值范围是 $(1, 2, 3)$, m ; μ_{eff} 为有效黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; G_k 为平均速度梯度引起的湍动能 k 的产生项, $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s}^3)$; G_b 为浮力引起的湍动能 k 的产生项, $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s}^3)$; Y_M 为可压缩流中脉动扩张对整体扩散率的影响,对于不可压缩流体其值为 0, $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s}^3)$; ϵ 是湍流耗散率, m^2/s^3 ; α_k 和 α_ϵ 分别是 k 和 ϵ 的有效 Prandtl 数的倒数,无量纲; $C_{1\epsilon}, C_{2\epsilon}, C_{3\epsilon}$ 为经验常数; S_k 和 S_ϵ 为用户自定义原项,单位分别为 $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s}^3)$ 和 $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s}^4)$; R_ϵ 为反映主流时均变化率的项, $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s}^4)$ 。

该模型能更好处理高应变率及流线弯曲程度较大的流动。本文中涉及的节流阀内部流场的分析采用 RNG $k-\epsilon$ 模型,并使用壁面函数法处理近壁区的流动,保证了分析的准确性。

2.2 粒子追踪模型

研究颗粒冲蚀的基础是对流域内大量的固体颗粒运动轨迹的计算,即拉格朗日追踪法(Lagrangian Tracing)。每一个颗粒代表实际流场中具有特定运动轨迹的固相粒子,被追踪的粒子描述了离散相的平均

运动。在使用拉格朗日追踪法时进行了如下的假设:

①忽略固相颗粒之间的相互作用;②不考虑固相颗粒引起的湍流;③忽略壁面材料冲蚀后几何形状改变对流场的影响;④认为固相颗粒是不发生化学反应、不碎裂的球体;⑤在拉格朗日坐标系下,颗粒在流场中的受力方程为:

$$\frac{d\mathbf{u}_p}{dt} = F_D(\mathbf{u} - \mathbf{u}_p) + \frac{\mathbf{g}(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + \mathbf{F} \quad (3)$$

其中,

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \frac{C_D Re}{24} \quad (4)$$

$$Re = \frac{\rho d_p |\mathbf{u}_p - \mathbf{u}|}{\mu} \quad (5)$$

式中: \mathbf{F} 为附加力(单位颗粒质量上的作用力),N/kg; $F_D(\mathbf{u} - \mathbf{u}_p)$ 为单位颗粒质量上的曳力,N/kg; \mathbf{u} 、 \mathbf{u}_p 分别为连续相和颗粒的速度,m/s; ρ_p 为颗粒的密度,kg/m³; \mathbf{g} 为重力加速度,m/s²; μ 为流体动力黏度,Pa·s; d_p 为颗粒直径,m; C_D 为曳力系数,无量纲; Re 为相对雷诺数,无量纲。

2.3 冲蚀方程

冲蚀磨损是一个复杂的过程,工程上使用有限的参数建立冲蚀模型,这些参数包括被冲击体材料、几何形状、宏观和微观接触条件、颗粒动力学特性等。Finnie^[17]建立了干燥环境下的切削磨损模型,随后新的模型不断被提出;Meng和Ludema^[18]研究发现众多的冲蚀模型中只有28个是有意义的(符合物理规律、能够实验验证),这些模型中应用最为广泛的是一系列半经验模型,即根据冲蚀理论构建冲蚀磨损方程的基本结构,基于实验数据确定待定的参数。

然而并不存在任何一个模型能精确预测所有材料的冲蚀率,根据控压钻井节流阀冲蚀磨损过程中涉及的主要参数和节流阀本身材料的特性,本文选择Alhert^[19]提出的冲蚀模型,认为决定冲蚀速率的主要因素是颗粒运动速度和接触角度,其形式如下:

$$E_R = AF_s V^{1.73} f(\theta) B^{-0.59} \quad (6)$$

$f(\theta)$ 由式(7)和式(8)决定^[20]:

$$f(\theta) = a\theta^2 + b\theta (\theta \leq \theta_0) \quad (7)$$

$$f(\theta) = x\cos^2\theta \sin\theta + y\sin^2\theta + z (\theta > \theta_0) \quad (8)$$

式中: E_R 为壁面材料磨损率,定义为壁面损失质量除以引起质量损失的颗粒质量,kg/kg; A 为经验常数; F_s 为颗粒形状系数,1代表尖锐的颗粒,0.2则认为是圆润的颗粒; V 为颗粒速度,m/s; B 为壁面材料的布氏硬度,HB; $f(\theta)$ 为冲击角度的函数, θ 为固体颗粒冲击角的弧度表示,rad; a 、 b 、 x 、 y 、 z 均为与壁面材料有关的经验常数。

3 算例分析

3.1 物理模型

建立完整的节流阀阀腔内部流体域的三维模型,其尺寸与实际尺寸相同,出、入口直径均为 $D = 103.2$ mm,进口流域延长为 $2D$,出口流域延长为 $5D$ (以利于湍流发展),阀芯、阀座按照控压钻井节流阀^[21]设计。图1是计算流体域模型的半剖图。

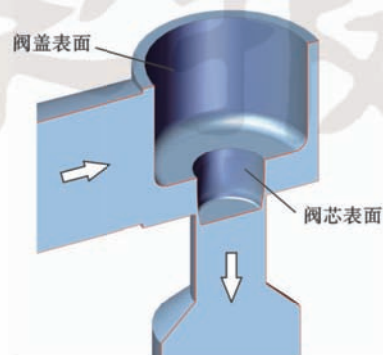


图1 计算流体域模型的半剖图

Fig. 1 Semi-sectional view of computational domain

连续相为水,密度为 $1\ 000$ kg/m³,动力黏度为 1.003×10^{-3} Pa·s;节流阀阀芯材料为40Cr,其材质化学组成分析结果见表1。颗粒为铝钒土陶粒砂,平均直径为 0.42 mm,堆密度为 $1\ 800$ kg/m³,视密度为 $3\ 300$ kg/m³,粒子以 1.1621 m/s的速度垂直进口面入射。采用随机追踪法在每一个流体运动的时间步长内,对粒子轨迹进行5次迭代。

表1 节流阀阀芯化学分析结果

Table 1 Chemical composition of throttle valve plug

组成	GB/T 3077-1999 规定含量 ^[22]	实测含量
C	0.37~0.44	0.41
Si	0.17~0.37	0.25
Mn	0.50~0.80	0.66
P	≤0.035	0.02
S	≤0.035	0.01
Cr	0.80~1.10	0.93

注:单位均为质量分数。

3.2 实验台设计

为验证仿真分析的可靠性,建立如图2所示的实验流程。离心砂泵从水箱抽取含砂水经流量传感器、平板阀、控压钻井节流阀后回到水箱,其中水箱中安装有搅拌器保证铝钒土陶粒砂悬浮在水中。液压站远程控制节流阀开度,位移传感器通过显示屏显示开度。流量传感器监测循环系统的流量,前、后压力传感器用以计算压差。

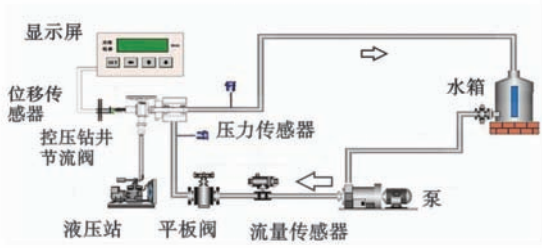


图 2 节流阀冲蚀试验流程

Fig. 2 Flow diagram of erosion experiment

4 计算结果

4.1 模型验证

计算压力速度耦合采用 SIMPLE 算法,动量离散采用一阶迎风格式,湍动能和湍流耗散率的离散均采用二阶迎风格式^[23]。

节流阀的流量系数^[24](K_v)是阀的一个重要指标,它只与阀的结构有关, K_v 被定义为:阀两端的静压损失(ΔP_{kv})为 1×10^5 Pa 时,规定行程下流过阀的特定体积流量。 K_v 可用下列方程式从试验结果中求出:

$$K_v = Q \sqrt{\frac{\Delta P_{kv}}{\Delta p} \cdot \frac{\rho}{\rho_w}} \quad (9)$$

式中: K_v 为流量系数, m^3/h ; Q 为被测体积流量, m^3/h ; ΔP_{kv} 为固定静压损失,其值为 10^5 Pa; Δp 为阀两端测出的静压损失,Pa; ρ_w 为水密度, kg/m^3 。

实验发现,流经节流阀的流量过低将引起节流阀流量系数曲线突变^[25],选用离心泵做验证试验时,节流阀开度稍小即不满足测试要求,因此选用大流量柱塞泵做验证试验,离心泵做长时间、大开度冲蚀试验。

仿真计算得到 K_v 值与实验实测 K_v 值相同则认为仿真模型和边界条件是合理的。表 2 是仿真数据和实验数据的对比,相应值的对比见图 3,二者贴合度很好,验证了仿真模型的正确性。

表 2 模型验证实验数据与仿真数据对比

Table 2 Comparison of test and simulation data in model verification experiment

开度/ %	仿真值		实测值	
	压降/MPa	流量/($m^3 \cdot h^{-1}$)	压降/MPa	流量/($m^3 \cdot h^{-1}$)
35	6.04	75.30	6.33	76.05
43	5.82	75.23	5.86	76.23
50	5.12	75.22	5.13	76.20
54	5.11	75.23	4.80	75.19
66	3.92	75.21	4.02	75.23
73	3.77	75.18	3.66	75.22

4.2 冲蚀轮廓特征对比

阀芯冲蚀 20 h 后的表面形貌如图 4。

多次实验均得到:①图 4 冲蚀轮廓线表明进、出口

位置较阀芯两侧冲蚀范围广,阀芯侧面冲蚀范围自进口位置到出口位置逐渐减小;②进、出口位置整个区域均有不同程度的冲蚀,侧面存在一个狭长的未冲蚀区域(图 4 圈中颜色较深的狭长区域),这个区域位于阀芯侧面的内凹面处。

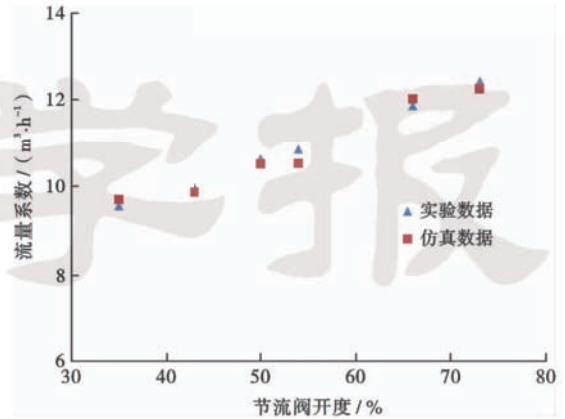


图 3 仿真与实验流量系数对比

Fig. 3 Experimental and predicted results for flow coefficient

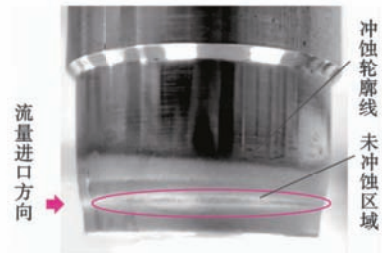
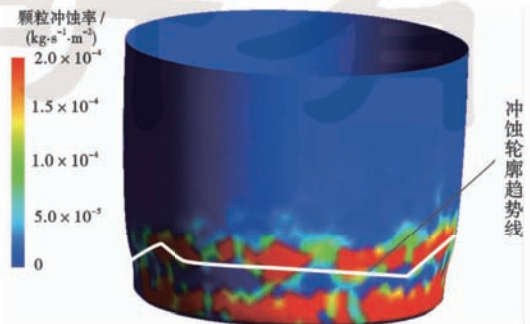


图 4 阀芯冲蚀 20 h 后的表面形貌

Fig. 4 Surface morphology of valve plug after 20 hours erosion

仿真得到了冲蚀率云图(图 5),仿真结果具有 2 个特征:①仿真冲蚀趋势线与试验冲蚀轮廓线在趋势上一致、位置相同,说明两者的冲蚀区域吻合。②阀芯内凹面处同样存在狭长的未冲蚀区域,其范围和位置与试验一致,形状与试验具有差异的原因是试验结果是肉眼观察到的,仿真结果是数值的云图表示,两者显



注:冲蚀轮廓趋势线仅对冲蚀明显部分(红色区域)进行了标记。

图 5 冲蚀率云图

Fig. 5 Erosion rate contours of valve plug

示精度存在差异。

对比表明,仿真结果具有实验轮廓的2个特征,说明该模型能够很好地预测冲蚀区范围和冲蚀轮廓。

4.3 质量损失对比

该模型可精确地计算出阀芯表面的冲蚀率(图5)。阀芯面单元表面积乘以相应单元的冲蚀率,求和后再对时间积分得到一定时间内的质量损失。仿真数据是不考虑阀芯形变的假设条件下得到的,实际上阀芯随冲蚀时间增长,阀芯表面材料损失,阀芯表面形貌改变,冲蚀率不断增加。冲蚀实验5h后阀芯表面形貌变形明显,因此对5h后的仿真冲蚀率做了修正即每小时2.6%的增长率。这样的处理是合理的,因为稳态计算节省了计算机资源,提高了预测的速度,但忽略了阀芯表面材料损失对冲蚀率的影响,对于短时间预测(阀芯表面未出现明显形貌改变)是准确的,对长时间(5h以上)冲蚀预测值偏低,因此进行必要的修正是合理的,修正后的质量损失数据如表3所示。

表3 实验仿真质量损失

Table 3 Experimental and predicted mass loss

冲蚀时间/h	仿真质量损失/g	实验质量损失/g	预测误差%
0	0	0	0
5	0.95	0.9	5.60
10	2.39	2.8	-14.60
15	4.08	4.6	-11.30
20	6.19	6.2	-0.16

4.4 固相颗粒流动特性

粒子轨迹追踪图反映了粒子运动过程中的物理变量的变化情况。由粒子的速度追踪图(图6)可知,液体携带固体颗粒向前运动,撞击阀盖后一部分粒子绕过阀盖撞击节流阀内腔壁面后,经反弹冲刷阀芯后部,一部分沿阀盖向下运动冲刷节流阀侧面,其余大多数粒子直接冲刷阀芯前部。阀芯后部颗粒数量少,冲蚀

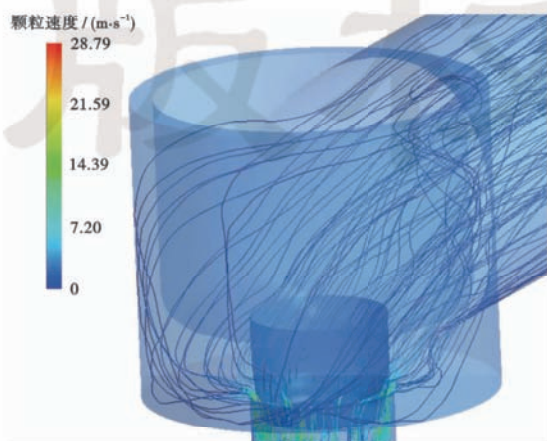


图6 粒子追踪图

Fig. 6 Trajectories of a number of sand particles

位置较高;阀芯侧面颗粒数量较多、速度快,冲蚀位置较低;阀芯前部颗粒数量最多、速度最快,冲蚀范围最广。

颗粒运动轨迹显示了固相颗粒的流动特性,同时合理解释了冲蚀轮廓(图4、图5)的形成原因,证明了仿真分析的合理性。

5 结论

(1) 通过对比实验和仿真的值,证明了所选模型能够精确地模拟复杂流场结构下的固-液两相流的速度、压力等流动特性,并准确地预测了冲蚀轮廓。

(2) 对于冲蚀质量损失,5h以内的仿真结果与实验结果贴合度很高,5h以后的预测值偏低,经合理修正后两者比较接近。随冲蚀时间增长,预测误差逐渐减小,最终达到1%以下,预测比较准确。

(3) 所使用的预测方法能够较为准确地预测节流阀阀腔内部固-液两相流的流动特性及一般的冲蚀规律,直观地反映了阀腔内部粒子速度、运动轨迹等特性。

参考文献

- [1] 杨谋,孟英峰,李皋,等. 钻井全过程井筒-地层瞬态传热模型[J]. 石油学报,2013,34(2):366-371.
Yang Mou, Meng Yingfeng, Li Gao, et al. A transient heat transfer model of wellbore and formation during the whole drilling process[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(2): 366-371.
- [2] 刘伟,蒋宏伟,周英操,等. 控压钻井装备及技术研究进展[J]. 石油机械,2011,39(9):8-12.
Liu Wei, Jiang Hongwei, Zhou Yingcao, et al. Study progress of equipment and technology in managed pressure drilling[J]. China Petroleum Machinery, 2011, 39(9): 8-12.
- [3] 王果,刘建华,丁超,等. 控压钻井条件下井身结构优化设计[J]. 石油学报,2013,34(3):545-549.
Wang Guo, Liu Jianhua, Ding Chao, et al. Casing program optimization with the managed pressure drilling technique[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(3): 545-549.
- [4] McCasland M, Barrilleaux M, Gai H, et al. Predicting and mitigating erosion of downhole flow-control equipment in water-injector completions[R]. SPE 90179, 2004.
- [5] Castberg T S, Johnsen R, Berget J. Erosion of hardmetals; dependence of WC grain size and distribution, and binder composition[J]. Wear, 2013, 300(1/2): 1-7.
- [6] 王国荣,朱颖,楚飞,等. PVD陶瓷镀膜工艺对控压节流阀冲蚀性能影响研究[J]. 热加工工艺,2015,44(2):145-149.
Wang Guorong, Zhu Hao, Chu Fei, et al. Research on effect of PVD ceramic coating process on erosion resistance properties of choke valve used in managed pressure drilling[J]. Hot Working Technology, 2015, 44(2): 145-149.
- [7] 李建庄,孙德顺,余畅,等. 几种材料的固体粒子冲蚀磨损性能

- [J]. 金属热处理, 2013, 38(11): 37-39.
- Li Jianzhuang, Sun Deshun, Yu Chang, et al. Solid particle erosion wear resistance of several materials[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2013, 38(11): 37-39.
- [8] 张继信, 樊建春, 詹先觉, 等. 水力压裂工况下 42CrMo 材料冲蚀磨损特性研究[J]. *石油机械*, 2012, 40(4): 100-103.
- Zhang Jixin, Fan Jianchun, Zhan Xianjue, et al. Research on the erosion wear characteristics of 42CrMo steel in hydraulic fracture conditions[J]. *China Petroleum Machinery*, 2012, 40(4): 100-103.
- [9] 冯益华, 邓建新, 史佩伟. 陶瓷材料冲蚀磨损的研究[J]. *陶瓷学报*, 2002, 23(3): 169-173.
- Feng Yihua, Deng Jianxin, Shi Peiwei. Study on the erosion wear of ceramics[J]. *Journal of Ceramics*, 2002, 23(3): 169-173.
- [10] Habib M A, Badr H M, Said S A M, et al. Solid-particle erosion in the tube end of the tube sheet of a shell-and-tube heat exchanger[J]. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 2006, 50(8): 885-909.
- [11] Lyczkowski R W, Bouillard J X. State-of-the-art review of erosion modeling in fluid/solids systems[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2002, 28(6): 543-602.
- [12] Wallace M S, Dempster W M, Scanlon T, et al. Prediction of impact erosion in valve geometries[J]. *Wear*, 2004, 256(9/10): 927-936.
- [13] Mazur Z, Campos-Amezcuca R, Urquiza-Beltrán G, et al. Numerical 3D simulation of the erosion due to solid particle impact in the main stop valve of a steam turbine[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2004, 24(13): 1877-1891.
- [14] Wong C Y, Solnordal C, Swallow A, et al. Predicting the material loss around a hole due to sand erosion[J]. *Wear*, 2012, 276-277: 1-15.
- [15] 黄勇, 施哲雄, 蒋晓东. CFD 在三通冲蚀磨损研究中的应用[J]. *化工装备技术*, 2005, 26(1): 65-67.
- Huang Yong, Shi Zhexiong, Jiang Xiaodong. The application of CFD to erosion research of tee[J]. *Chemical Equipment Technology*, 2005, 26(1): 65-67.
- [16] 周兆明, 练章华, 万夫. 高压管汇冲蚀磨损的多相流仿真[J]. *计算机辅助工程*, 2013, 22(5): 101-104.
- Zhou Zhaoming, Lian Zhanghua, Wan Fu. Multiphase flow simulation on erosion of high-pressure manifold[J]. *Computer Aided Engineering*, 2013, 22(5): 101-104.
- [17] Finnie I. Some reflections on the past and future of erosion[J]. *Wear*, 1995, 186-197: 1-10.
- [18] Meng H C, Ludema K C. Wear models and predictive equations: their form and content[J]. *Wear*, 1995, 181-183: 443-457.
- [19] Ahlert K. Effects of particle impingement angle and surface wetting on solid particle erosion on ANSI 1018 steel[D]. Tulsa: University of Tulsa, 1994.
- [20] 崔钺, 兰惠清, 康正凌, 等. 基于流场计算的天然气集输管线 CO₂ 腐蚀预测模型[J]. *石油学报*, 2013, 34(2): 386-392.
- Cui Yue, Lan Huiqing, Kang Zhengling, et al. Improvement of a CO₂ corrosion prediction model for natural gas pipelines based on flow field calculation[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2013, 34(2): 386-392.
- [21] 王国荣, 陶思宇, 付玉坤, 等. 控压钻井节流阀阀芯轮廓曲线设计[J]. *石油矿场机械*, 2013, 42(11): 55-58.
- Wang Guorong, Tao Siyu, Fu Yukun, et al. Profile curve design of choke valve trim of managed pressure drilling[J]. *Oil Field Equipment*, 2013, 42(11): 55-58.
- [22] 中国钢铁工业协会. GB/T 3077-1999, 合金结构钢[S]. 北京: 中国标准出版社, 1999.
- Chinese Iron and Steel Industry Association, GB/T 3077-1999, Alloy structure steels[S]. Beijing: Standards Press of China, 1999.
- [23] 王福军. 计算流体动力学分析: CFD 软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- Wang Fujun. Computational fluid dynamics analysis: theory and application of CFD software[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.
- [24] 中国机械工业联合会. GB/T 17213. 1-1998, 工业过程控制阀第 1 部分: 控制阀术语和总则[S]. 北京: 中国标准出版社, 1998.
- China Machinery Industry Federation, GB/T 17213. 1-1998, Industrial-process control valves part 1: Control valve terminology and general considerations[S]. Beijing: Standards Press of China, 1998.
- [25] Wang G R, Tao S Y, Liu Q Y, et al. Experimental validation on a new valve core of the throttle valve in managed pressure drilling[J/OL]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2014, 6: 324219. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/324219>.

(收稿日期 2014-12-14 改回日期 2015-05-05 编辑 宋宁)