

# 变注入参数空气钻井流场模拟对比分析

朱红钧<sup>1</sup> 林元华<sup>1</sup> 李 强<sup>1</sup> 杜仁德<sup>2</sup> 王新虎<sup>3</sup> 牟鹤林<sup>4</sup>

(1. CNPC 石油管力学和环境行为重点实验室(西南石油大学),四川 成都 610500;2. 中国石化 西南油气分公司,四川 成都 610081;3. 中国石油 管材研究所,陕西 西安 710065;4. 中国石油 塔里木油田公司,新疆 库尔勒 841000)

**摘要:**空气钻井具有钻速快、成本低、对储层伤害小等特点,但关于井内流场分布及工艺参数研究仍不够完善。基于流体力学方法,利用 Fluent 软件对空气钻井不同注入参数下的流场进行了数值模拟,得出了井内压力和流速分布。结果表明:过流截面积变化与钻具表面的粗糙度均会影响流场,关键部位因环空截面积的增大流速明显减小,易于岩屑的沉积;注入压力一定时,井口是否采用回压,要根据井筒内具体的流速分布确定,流速既要满足携岩要求又不可超过冲蚀速度。因此,根据井眼净化要求,结合冲蚀控制标准,利用 Fluent 软件进行多组次模拟分析对比,可取得较优的工艺参数组合,为空气钻井注入参数设计提供了一种简单、快捷的方法。

**关键词:**空气钻井;注入参数;数值模拟;流场;Fluent 软件

中图分类号:TE242.6 文献标识码:A 文章编号:1001-0890(2010)04-0049-04

## Analysis of Flow Field in Air Drilling with Variation of Injecting Parameters

Zhu Hongjun<sup>1</sup> Lin Yuanhua<sup>1</sup> Li Qiang<sup>1</sup> Du Rende<sup>2</sup> Wang Xinhua<sup>3</sup> Mou Helin<sup>4</sup>

(1. CNPC Key Laboratory for Mechanical and Environmental Behavior of Tubular Goods (Southwest Petroleum University), Chengdu, Sichuan, 610500, China; 2. Southwest Branch, Sinopec, Chengdu, Sichuan, 610081, China; 3. Tubular Goods Research Center, CNPC, Xi'an, Shanxi, 710065, China; 4. Tarim Oilfield Company of PetroChina, Kurle, Xinjiang, 841000, China)

**Abstract:** Air drilling has good rate of penetration, low cost, low reservoir damage, etc, while the distribution of air flow field and technical parameters still need more investigation. Based on the computation fluid dynamics theory, the flow field in well was simulated using FLUENT with various injecting parameters. The distribution of pressure and velocity were obtained. The results show that various cross-section and surface roughness of BHA would impact the flow field. The velocity reduced significantly with the increase of annulus area which caused cuttings deposition. With the constant injection pressure, whether or not to use back pressure is determined by flow distribution in wellbore. Velocity has to meet the requirements of cutting transport and lower than corrosion speed. Combined with the minimum velocity for cuttings transport and erosion velocity, the appropriate injecting parameters were obtained by comparative analysis. A simple and effective method for air drilling design was obtained.

**Key words:** gas drilling; injection parameter; numerical simulation; flow field; Fluent software

空气钻井是以空气作为循环介质携带岩屑的钻井技术,属于欠平衡钻井技术的一个分支,因其钻速快、成本低和对储层伤害小的显著特点而倍受人们关注<sup>[1-2]</sup>。上世纪 90 年代,美国、加拿大及欧洲的一些国家就开始应用空气钻井技术,并不断发展完善该技术<sup>[3]</sup>。近年来,国内新疆油田、长庆油田、四川油田、玉门油田等也开始推广应用空气钻井技术,并取得了良好的效果<sup>[4-11]</sup>。然而,空气钻井技术还不够完善,尤其是在井内流场分布的控制和工艺参数

收稿日期:2009-02-22;改回日期:2010-05-24

基金项目:“新世纪优秀人才支持计划”(编号:NCET-08-0907)、四川省杰出青年学科带头人培养基金(编号:06ZQ026-028)和中国石油天然气集团公司应用基础研究项目“非 API 标准油气井管材及管柱安全性与优化设计技术研究”(编号:2008A-3005)资助

作者简介:朱红钧(1983—),男,江苏靖江人,2004 年毕业于河海大学环境工程专业,2007 年获河海大学流体力学专业硕士学位,讲师,主要从事油气流体力学、计算流体力学方面的研究工作。

联系方式:(028)83032206, ticky863@126.com

的选择上还需进行进一步攻关<sup>[12-13]</sup>。Angel 对空气钻井气体需量进行了理论分析<sup>[14]</sup>,制作了气体需量计算图表,后来 Cooper 等<sup>[15]</sup>对其作了一定程度的改进。练章华等<sup>[16]</sup>分析了空气的携岩能力,建立了相关数学模型。但由于进行空气钻井时井下环境复杂,而模型往往基于一定的假设条件,因此所建模型缺乏通用性。随着模拟软件的成熟,Adewumi<sup>[17]</sup>、孟英峰<sup>[18]</sup>、郭建华<sup>[19]</sup>等模拟分析了井内气固两相流场,将数值模拟方法应用于空气钻井技术研究。鉴于此,笔者基于流体动力学方法,利用 Fluent 软件对空气钻井时井眼内不同注入参数下的流场进行了数值模拟分析,得出了钻柱与环空内压力、流速分布,并通过对比找出了最优注入参数。

## 1 研究问题及模型

笔者选择川东北地区二开时一种空气钻井时常用组合参数建立模型。井身结构:井眼直径 328.5 mm,井深 1 500 m,φ339.7 mm 套管下深 600 m。钻具组合:φ311.1 mm 钻头+φ228.6 mm 钻铤×60 m+φ203.2 mm 钻铤×90 m+φ177.8 mm 钻铤×90 m+φ139.7 mm 加重钻杆×47 m+φ127.0 mm 钻杆。其他参数:井口温度为 298.15 K,地温梯度为 3 °C/100 m;气体常态下密度为 1.225 kg/m<sup>3</sup>;套管、钻杆、钻铤的绝对粗糙度 0.046 78 mm,密度 7 750 kg/m<sup>3</sup>,比热容 471.54 J/(kg·K),导热系数 42.3 W/(m·K);裸眼绝对粗糙度 4.08 mm,岩屑密度 2 600 kg/m<sup>3</sup>,比热容 1 100 J/(kg·K),导热系数 0.3 W/(m·K)。

考虑到井筒内循环流体与土壤之间的传热是持续的,在井筒外设置半径为 50 m 的土壤区域,建立了全井段模型,并用六面体单元对其进行网格划分,如图 1 所示。

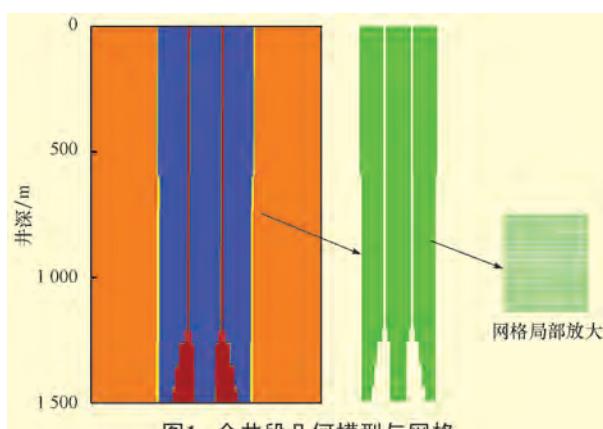


图 1 全井段几何模型与网格

钻杆内部为空气单相流,环空为空气、岩屑两相流,考虑空气的可压缩性和黏热效应,雷诺时均方程为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \bar{u} u'_i u'_j \right) + \rho f_i \quad (2)$$

式中:下标  $i, j$  分别为 1、2、3, 分别对应  $x, y, z$  三个方向;  $\rho$  为流体密度, kg/m<sup>3</sup>;  $t$  为时间, s;  $u$  为速度, m/s;  $\mu$  为动力黏性系数, Pa·s;  $p$  为压力, Pa;  $f$  为单位质量力, m/s<sup>2</sup>。  $\bar{u}$  为时均速度, m/s;  $u'$  为脉动速度, m/s; 脉动速度相关项  $\rho \bar{u} u'_i u'_j$  为雷诺应力, kg/(m·s<sup>2</sup>)。

笔者基于有限体积法,选用 SIMPLE 法进行压力、速度耦合,并采用  $\kappa-\epsilon$  湍流模型将式(1)和式(2)组成的方程组封闭。所采用的  $\kappa-\epsilon$  湍流模型为:

$$\rho \frac{d\kappa}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\kappa} \right) \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \right] + G_\kappa + G_b - \rho \epsilon - Y_M \quad (3)$$

$$\rho \frac{d\epsilon}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S \epsilon - \rho C_2 \frac{\epsilon^2}{\kappa + \sqrt{\nu \epsilon}} + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{\kappa} C_{3\epsilon} G_b \quad (4)$$

式中:  $\kappa$  为单位质量湍动能, m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>;  $\epsilon$  为单位质量湍动能耗散率, m<sup>2</sup>/s<sup>3</sup>;  $S$  为平均应变率, s<sup>-1</sup>;  $\mu_t$  为湍流黏性系数, Pa·s;  $\nu$  是分子运动黏性系数, m<sup>2</sup>/s;  $G_\kappa$  为平均速度梯度引起的湍动能, N/(m<sup>2</sup>·s);  $G_b$  为浮力影响引起的湍动能, N/(m<sup>2</sup>·s);  $Y_M$  是可压速湍流脉动膨胀对总耗散率的影响, kg/(m·s<sup>3</sup>);  $C_1, C_{1\epsilon}, C_2, C_{3\epsilon}$ 、 $\sigma_\kappa, \sigma_\epsilon$  为常数,  $C_1 = \max \left[ 0.43, \frac{S\kappa/\epsilon}{S\kappa/\epsilon + 5} \right]$ ,  $C_{1\epsilon} = 1.44$ ,  $C_2 = 1.9$ ,  $C_{3\epsilon} = 1$ ,  $\sigma_\kappa = 1.0$ ,  $\sigma_\epsilon = 1.2$ 。

求方程组数值解时,采用二阶迎风格式离散方程。设置了压力入口、压力出口和固体壁面等边界条件,注入压力为 0.7~1.2 MPa,环空井口压力一般取 0 MPa,若需加回压,取 0.1~0.2 MPa。利用 Fluent 软件对空气钻井不同注入参数下的流场进行数值模拟。

## 2 数值结果与分析

图 2 为注入压力为 0.9 MPa、井口加回压与不加回压时的井内压力变化。从图 2 可以看出,空气

由钻柱进入至环空流出的整个过程中压力不断下降,但钻柱内压力变化不明显,其原因是裸眼井壁摩阻相对较大、携岩需要消耗大部分压能。不同回压下环空压力曲线的变化趋势基本相同,仅因回压的影响造成环空压降的幅度有所区别,回压越大,环空压降幅度越小。

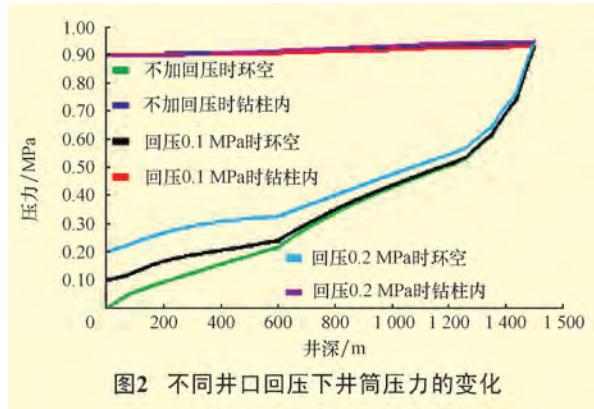


图2 不同井口回压下井筒压力的变化

由于井底水眼过流截面的突然缩小造成了明显的压降,井口不加回压与井口加0.1和0.2 MPa回压3种情况下的水眼压降分别为3.62、3.57和3.54 kPa,差距不是很大。在钻杆、钻铤和套管等组件的连接处压力变化趋势会急剧改变,这是由过流截面变化及不同组件具有不同的表面粗糙度所导致的。

环空内流体返速与井口回压设置紧密相关,注入压力为0.9 MPa,不加回压时,井口最大流速达到121.76 m/s,而加0.1和0.2 MPa回压时的最大流速分别为61.69和41.34 m/s,如图3所示。环空中为气固两相流,流速由下至上呈指数递增,越接近井口增幅越大。在钻铤与钻杆或套管与裸眼的连接处,速度变化趋势发生改变,即流速在环空截面积增大部位突然减小,这将易于岩屑的沉积。

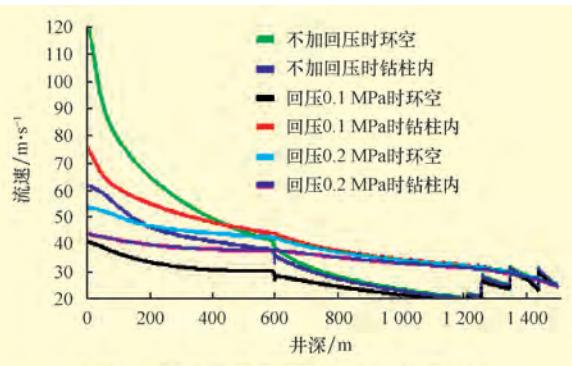


图3 不同井口回压下环空流体速度变化

根据适用两相流动体系的管道冲刷腐蚀控制设计的API RP14E标准<sup>[20]</sup>,流体冲刷速度 $v_{cric}$ 应满足:

$$v_{cric} = \frac{81.97}{\sqrt{\rho}} \quad (3)$$

式中,  $v_{cric}$  为流体冲刷速度, m/s;  $\rho$  为混合流体密度, kg/m<sup>3</sup>。

3种情况下井底附近的流速均超过了冲刷流速,有助于破岩,这是空气钻井所需要的。从图3可以看出,井口不加回压时,井深约450 m至井口段的环空流体速度超过了冲刷流速,对钻柱与井壁造成冲蚀,影响了其稳定性,在进行空气钻井时中应规避。当出口加0.1 MPa回压时,距井口约200 m井段的流体流速超标,与不加回压时相比,不利井段长度减少了约250 m,然而这仍然不适于工程实际。井口加0.2 MPa回压时,除井底外的整个环空井段流速均低于冲刷流速,满足防冲蚀要求,有效保护了钻杆、套管及井壁的稳定,适合于实际施工。

注入压力为0.9 MPa、回压为0.2 MPa的参数配组较适于该实例,其全井段速度云图见图4,由于轴向长度远远大于径向长度,所以图中横纵比为1:1000。通过形象直观的云图,有助于对整个井筒内及关键点处流场的控制。空气在钻柱中由上至下速度有小幅增大,到达钻铤处,因过流断面突然缩小导致流速突然增大,随后又以一定增幅直至井底,井底流速为5~10 m/s;环空中需关注的关键部位主要为钻铤与钻铤、钻铤与钻杆、套管与裸眼的连接处,在满足防冲蚀的条件下,要达到井眼净化的要求,就必须使关键处流体达到一定流速以满足携岩要求。从图4可看出,关键部位的最小速度大于22 m/s,大于最小临界流速15 m/s,可满足井眼净化要求。

改变注入压力,进行多组参数模拟对比分析,结果见表1。在经济、设备条件允许的情况下,选用组次3、5、8的参数组合可较好地满足实例井工程需要,而该实例井二开时注气量为80~90 m<sup>3</sup>/min,注入压力为0.7~0.9 MPa,表明计算结果与实际情况吻合较好。

表1 多组次参数模拟结果

组次	注入压力/ MPa	井口压力/ MPa	注气量/ m <sup>3</sup> ·min <sup>-1</sup>	出口最大返速/ m·s <sup>-1</sup>
1	0.9	0	110	121.76
2	0.9	0.1	90	61.69
3	0.9	0.2	80	41.34
4	1.2	0.2	110	50.57
5	0.7	0.1	80	40.12
6	1.1	0.2	110	48.39
7	0.8	0.1	90	54.65
8	1.0	0.2	100	43.91

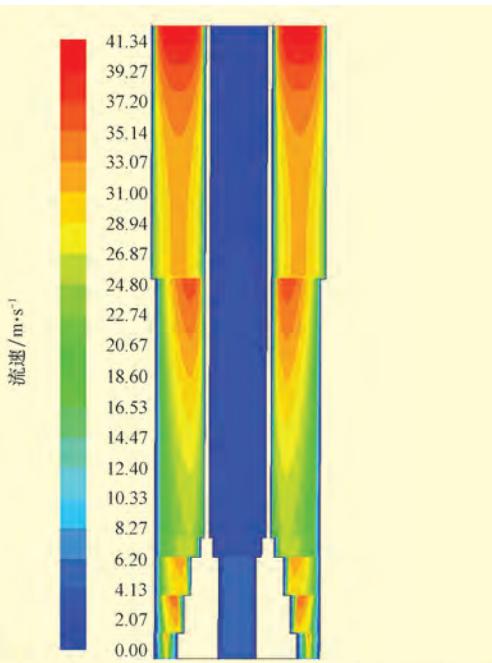


图4 出口0.2 MPa时的流速分布云图(横纵比为1:1 000)

### 3 结 论

1) 过流截面积变化与钻具表面粗糙度均会影响流场,关键部位因环空截面积的增大流速明显减小,易于岩屑的沉积;注入压力一定时,井口是否采用回压,要根据井筒内具体的流速分布确定,既要满足携岩要求又不可超过冲蚀标准。

2) 利用 Fluent 软件模拟空气钻井井筒内流场是可行的,模拟所得流场的形象可视,为整个井段及关键点处流场控制提供了便捷。

3) 结合冲蚀控制标准、井眼净化要求,利用 Fluent 软件进行多组次模拟参数分析对比可得到较优的工艺参数组合,为空气钻井参数设计提供了一种简单、快捷的方法。

### 参 考 文 献

- [1] 李玉飞,孟英峰,聂政远,等.空气钻井提高钻速机理研究[J].石油钻探技术,2006,34(4):9-11.
- [2] 晁文学,林勇.国外空气钻头的研究与应用[J].石油钻探技术,2001,29(1):39-40.
- [3] 朱江,王萍,蔡利山,等.空气钻井技术及其应用[J].钻采工艺,2007,30(2):145-148.
- [4] 马光长.空气钻井技术及其应用[J].钻采工艺,2004,27(3):4-8.
- [5] 孙继明,侯树刚,李铁成.空气钻井技术在普光D-1井的应用[J].石油钻探技术,2006,34(1):24-26.
- [6] 魏学成,张新旭,翟建明,等.空气钻井技术在老君1井的应用[J].石油钻探技术,2006,34(4):20-23.
- [7] 田鲁财,刘永贵,白晓捷,等.空气钻井技术在徐深21井的应用[J].石油钻探技术,2006,34(4):27-29.
- [8] 陈济峰,燕修良,高航献.川东北地区气体钻井技术实践与认识[J].石油钻探技术,2009,37(4):39-42.
- [9] 孙起昱,张雨生,王爱芳.空气锤在普光气田气体钻井中的应用[J].石油钻探技术,2009,37(4):68-72.
- [10] 黄松伟.普光气田空气钻井取心技术[J].石油钻探技术,2009,37(3):110-130.
- [11] 李伟廷.元坝1井超深井钻井技术[J].石油钻探技术,2009,37(2):94-99.
- [12] 侯树刚,舒尚文,李铁成,等.空气钻井安全钻进特性分析[J].石油钻探技术,2007,35(6):50-53.
- [13] 邹海洋,狄勤丰,姚建林,等.气体钻井钻柱失效机理分析[J].石油钻探技术,2008,36(3):55-58.
- [14] Angel R R. Volume requirements for air or gas drilling[J]. Journal of Petroleum Technology, 1957, 9(2): 325-330.
- [15] Leonard W C, Roland A H, Bobby R P. Air drilling techniques [R]. SPE 6435, 1977.
- [16] 练章华,孟英峰,唐波.反循环空气钻井钻头结构设计及其流场分析[J].石油机械,2003,31(增刊1):15-17.
- [17] Adewumi M A, Tian Shifeng. Analysis of air drilling hydraulics[R]. SPE 21277, 1990.
- [18] 孟英峰,练章华,梁红,等.气体钻水平井的携岩 CFD 数值模拟研究[J].天然气工业,2005,25(7):50-52.
- [19] 郭建华,余朝毅,李黔,等.气体钻井井筒冲蚀作用定量分析及控制方法[J].石油学报,2007,28(6):129-132.
- [20] Russell R, Shirazi S, Macrae J. A new computational fluid dynamics model to predict flow profiles and erosion rates in downhole completion equipment[R]. SPE 90734, 2004.

[审稿 孟英峰]

## 国内首次应用膨胀筛管技术修复套损井

孤岛南32-05井是胜利油田的一口稠油热采井,套管直径177.8 mm。投产约年后发现1 260.5~1 265.6 m井段套管变形、破裂,关井停产。为使该井恢复生产,胜利油田应用膨胀筛管技术对该井进行了修复。

先大修扩铣打通道,在套管具备足够通径后,以膨胀悬挂器悬挂膨胀筛管,膨胀悬挂器坐挂深度1 241.52 m,然后在1 256.59~1 269.13 m井段处下入带有2个膨胀螺纹、长12.54 m的膨胀筛管进行膨胀作业。膨胀筛管膨胀后紧贴φ177.8 mm套管内壁,膨胀后膨胀筛管内径约140 mm,比普通筛管内径扩大38 mm,增大了泄油面积,减少了生产压差,提高了油井产量。该井所用膨胀筛管技术为胜利油田自主研发,该技术采用先悬挂、后膨胀的方式完成膨胀过程,采用特殊防砂结构及特种螺纹连接方式,膨胀工具具有可变径及二次膨胀功能。该技术在孤岛南32-05井的成功应用,是国内首次应用膨胀筛管技术修复套损井。