

涡动钻柱内赫巴流体的流动特性研究

张晋凯, 李根生, 黄中伟, 田守增, 史怀忠

(油气资源与探测国家重点实验室(中国石油大学(北京)), 北京 102249)

摘 要:为了揭示钻井液在钻柱内的流动特性,采用数值模拟方法建立了涡动钻柱内赫巴流体的流动模型,结合流体力学相关理论,对比分析了速度剖面与表观黏度剖面,研究了钻柱自转速度、公转速度、轴向流速及流体密度等参数的变化对钻柱内流场的影响,得到了各参数对涡动钻柱内摩阻压耗的影响规律。研究表明,公转速度正向增大或反向减小时摩阻压耗都有减小的趋势,自转速度增大时摩阻压耗有增大的趋势。由此可见,考虑钻柱涡动的摩阻压耗变化规律,可使涡动钻柱内钻井液的描述更接近于实际钻井工况,有助于钻井液循环系统的优化。

关键词: 涡动 钻柱 钻井液 赫巴模式 流场特性

中图分类号: TE21 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-0890(2013)05-0082-07

Behavior of Herschel-Bulkely Fluid Flow in Whirl Drill String

Zhang Jinkai, Li Gensheng, Huang Zhongwei, Tian Shouceng, Shi Huaizhong

(State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum (Beijing), Beijing, 102249, China)

Abstract: In order to reveal flow behavior of drilling fluid in drill string, numerical simulation method is adopted to establish a mathematical flow model about Herschel-Bulkely fluid in whirl drill string. Combined with the theory of fluid mechanics, the model was used to analyze and compare velocity and apparent viscosity profiles. The effects of variation in drill string rotation velocity, revolution velocity, axial flow velocity and fluid density on flow field were examined, the regularity of effect with each parameter on friction pressure loss in whirl drill string was found. The study shows that friction pressure loss was reduced with the positive increase or reverse decrease of revolution speed, but friction pressure loss increased with the increase of rotation speed. Therefore, when taking friction pressure loss into account, the description of drilling fluid flow in whirl drill string will be much closer to actual drilling condition, facilitating the optimization of drilling circulation system, it can be of great significance to safe and efficient drilling.

Key words: whirling; drill string; drilling fluid; Herschel-Bulkely Model; flow performance

钻井工程发展早期,美国石油工程专家 A. Lubinski 认为钻进过程中底部钻具组合在垂直井中处于自转状态,后来国内外学者进一步研究发现,钻柱在井眼内的运动非常复杂,不仅有自转,还会出现涡动现象^[1-3]。一般而言,安装稳定器附近的井段,钻柱旋转比较平稳,旋转状态可看作只有自转;但在缺少扶正器支撑的井段,由于井壁与钻柱外壁的间隙较大,钻柱(包括底部钻具组合)在井眼内按顺时针方向以转盘转速绕自身轴线旋转的同时,由于离心力、钻柱弯曲等原因贴向井壁,并在摩擦力的作用下依各自所处的条件以一定的旋转速度绕井眼轴线做顺时针或逆时针转动,形成了在井眼内的涡动^[4]。

涡动钻柱内的流场主要有自转流场、公转流场和轴向流场,这 3 种流场按照矢量合成原理叠加后就构成了一种复杂的螺旋流场,可以将钻柱内的这种流动状态视为紊流。因此,为了揭示涡动钻柱内钻井液的流动特性,通过建立流动模型,研究了相同条件

收稿日期: 2013-06-20; **改回日期:** 2013-09-03。

作者简介: 张晋凯(1980—),男,陕西西安人,2003 年毕业于西安石油大学电气工程及其自动化专业,油气井工程专业在读博士研究生,主要从事油气井流体力学与工程方面的研究。

联系方式: 15210879854, bob33@163.com。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目“深井复杂地层安全高效钻井基础研究”(编号:2010CB226704)部分研究内容。

下状态最为接近钻井液的赫巴流体(赫谢尔-巴尔克莱模式流体)的流动特性。

1 涡动钻柱内赫巴流体流动模型的建立

1.1 钻井液模型

以 15 m 长 $\phi 139.7$ mm 钻柱内的赫巴流体为研究对象,考查加入钻柱复杂旋转效应后流体的流动特性。赫巴模式属于三参数流变模式,又称修正的幂律模式或有屈服值的幂律模式,其流变模式为^[5]:

$$\tau = \tau_{HB} + K\dot{\gamma}^n \quad (1)$$

式中: τ 为剪切应力,Pa; τ_{HB} 为赫巴模式的屈服值,Pa; K 为稠度系数, $\text{Pa} \cdot \text{s}^n$; n 为流性指数; $\dot{\gamma}$ 为剪切速率, s^{-1} 。

选用文献[6]中介绍的一种油基钻井液的黏度数据,按照赫巴模式回归处理,得出了较为合理的具体数学模型,用数值描述为^[7]:

$$\tau = 2.474\,49 + 0.121\,77\dot{\gamma}^{0.740\,11} \quad (2)$$

1.2 几何模型

采用基于交错网格的 SIMPLEC 算法对连续性方程和 N-S 方程进行离散化处理,为保证计算的精度,采用二阶格式对动量方程的对流项进行离散化。网格几何模型如图 1 所示。

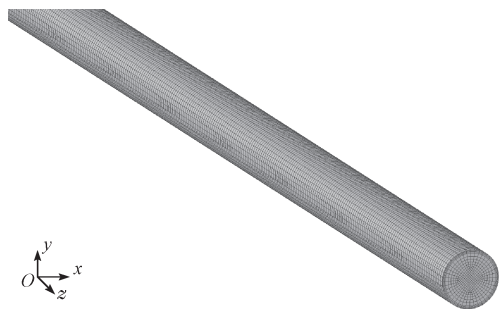


图 1 钻柱内流体的几何模型

Fig. 1 Geometric model of fluid in drill string

该几何模型设置了速度入口、压力出口、旋转壁面(管壁)等 3 类边界类型。钻柱公转时,将井筒中轴线作为旋转对称轴;自转时,将钻柱中轴线作为旋转对称轴,设两轴间距为 50 mm。管壁粗糙度设为水力光滑且为无滑移壁面,靠近管壁面处使用加密网格,速度入口采用柱坐标的速度分量方式。

1.3 紊流模型

设流体为一定密度和黏度条件下的不可压缩

流体,连续性方程和 N-S 方程共同构成了钻柱内流动的控制方程,采用有限体积法进行离散,建立的流动数学模型未涉及传热与能量,也不考虑重力影响^[8-10]。

紊流模型采用 $k-\epsilon$ 模型,该模型又可分为标准 $k-\epsilon$ 模型、RNG $k-\epsilon$ 模型和 Realizable $k-\epsilon$ 模型。经过分析比较可知,Realizable $k-\epsilon$ 模型更符合紊流的物理规律,将湍动黏度模型中的系数与应变率联系起来不再是一个常数,从而实现对湍动黏度模型中系数的数学约束,这就避免了标准 $k-\epsilon$ 模型在时均应变率特别大时有可能导致负的正应力的情况。这样可更好地表示包括旋转均匀剪切流、包含有射流和混合流的自由流、管道内流动、边界层流动以及带有分离的流动,因此紊流模型采用 Realizable $k-\epsilon$ 模型^[11]。

2 涡动钻柱内赫巴流体流动特性分析

2.1 无旋转钻柱内的流场特性

先对不旋转钻柱内流体的流动进行计算分析,并与有涡动效应的钻柱内流体流动特性进行对比。选取的钻井液密度为 $1\,000 \sim 2\,200 \text{ kg/m}^3$;流变模式按照式(2)设定,根据目前地面钻井泵的排量范围确定轴向流速为 $2 \sim 6 \text{ m/s}$ 。在不旋转的情况下合理设置 2 个旋转轴且将 2 个旋转运动的角速度都设为 0,将上述参数分别搭配进行计算,待收敛后得到这一段 15 m 长钻柱内的摩阻压耗曲线(见图 2)。从图 2 可以看出,摩阻压耗曲线随轴向流速和密度的增大呈增大趋势,这与范宁摩阻公式所表示的摩阻压耗变化规律相吻合^[12]。

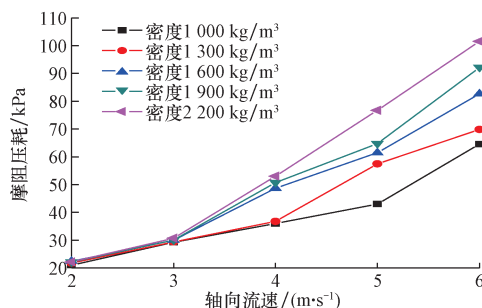


图 2 不旋转钻柱内的摩阻压耗

Fig. 2 Friction pressure loss in non-rotating drill string

图 3、图 4 分别为无旋转普通管流的合速度与表观黏度剖面(图例由 5 段字符构成,第 1 段字符 z09 表示 15 m 长钻柱在距入口 9 m 处的横截面;第 2 段字符表示密度,单位为 kg/m^3 ;第 3 段字符表示轴向流速,

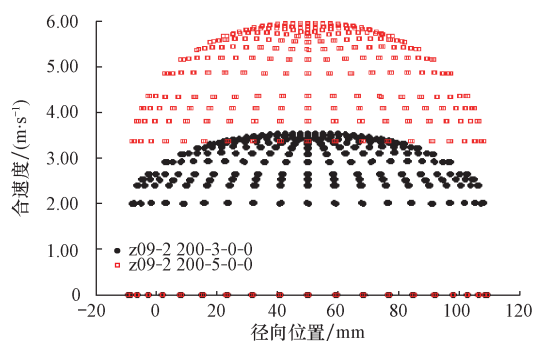


图3 不旋转钻柱内的合速度剖面

Fig. 3 Resultant velocity profile in non-rotating drill string

单位 m/s;第4段字符表示自转角速度,单位 rad/s;第5段字符表示公转角速度,单位 rad/s。横坐标的0点是公转轴穿过的位置;横坐标的50对应的位置是自转轴穿过的位置。以下出现的剖面图,图例均按照此约定)。图3中合速度剖面及其变化规律也与一般的管流一致,由于引入了赫巴流变模式,导致表观黏度的变化随着轴向流速的增大明显减小(见图4)。另外,图3未给出径向和切向的速度剖面,是因为这2个速度剖面数值很小,且没有叠加旋转效应,变化规律随机性较大,可以忽略^[13]。

2.2 涡动钻柱内的流场特性分析

考虑钻柱涡动后,在密度及轴向流速参数的基

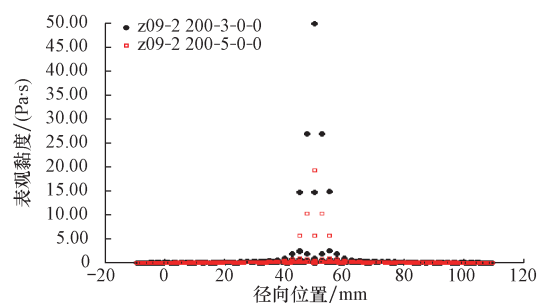


图4 不旋转钻柱内的表观黏度剖面

Fig. 4 Apparent viscosity profile in non-rotating drill string

础上还需要增加自转角速度和公转角速度2个运动参数。自转角速度设为3.14~18.84 rad/s,公转角速度的大小同自转角速度,但方向有正负之分。密度、轴向流速参数的设置同前文所述。由此可见,需考查的参数较多,应用正交分析法进行数值模拟,可以在不影响数据分析的前提下减小计算量。

钻柱在井眼内的涡动会对钻柱内钻井液的流场产生很大影响。钻柱的自转使其内部的钻井液以钻柱中轴线为对称轴做旋转运动;钻柱的公转使其内部的钻井液以井筒中轴线为旋转轴做旋转运动,根据矢量分解与合成原理,自转和公转共同作用于钻柱内的钻井液,使钻井液的流场兼具自转和公转的影响。图5为钻柱涡动时在距入口9 m处横截面上的螺旋流场。

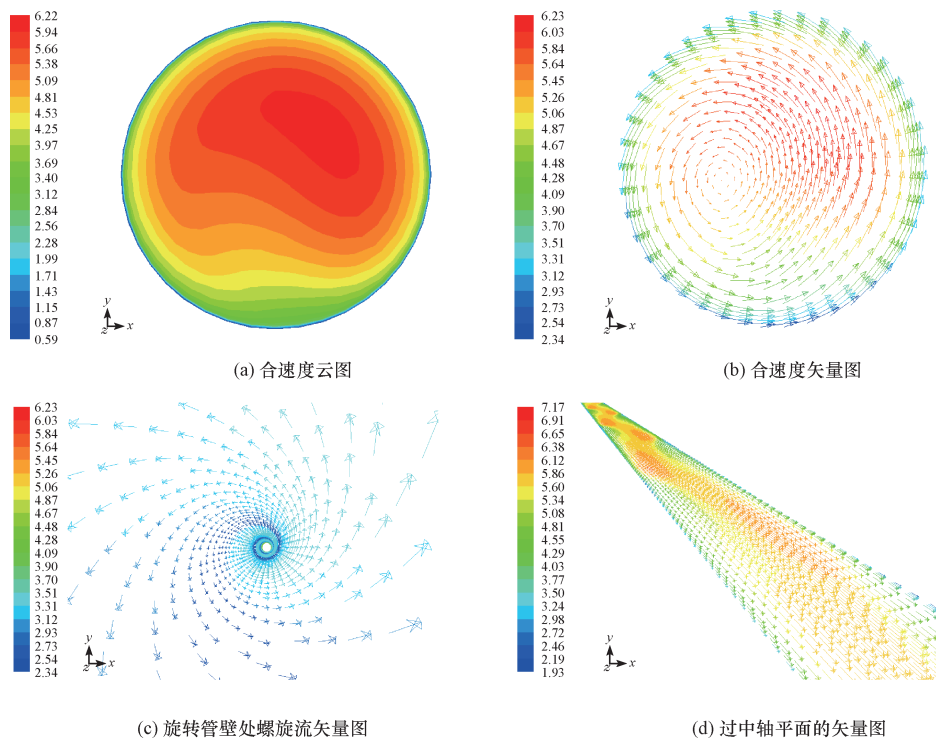


图5 涡动钻柱内的螺旋流场

Fig. 5 Spiral flow field in whirl drill string

从图 5(a)可以看出,公转效应使速度核心区偏向一侧且被挤扁;从图 5(b)可以看出,公转效应使漩涡中心偏向一侧。图 5(a)的速度核心区位置与图 5(b)的漩涡位置并不重合,漩涡中心的合速度由于旋转线速度较小,合成后的合速度在数值上也较小,故其不可能出现在速度核心区。图 5(d)中,平面内的速度核心区由于公转效应而在平面内周期震荡,反映在空间即速度核心区将构成螺旋线形状。由此可见,由于钻柱涡动形成的螺旋流场是非对称的,速度核心区为螺旋线形的复杂管内流场。

2.2.1 公转速度对钻柱内流场的影响

自转和公转坐标系的建立都遵循右手准则,钻进中转盘沿顺时针方向自转,根据已有研究,公转有顺时针和逆时针 2 个方向。当公转为顺时针方向时,与自转方向一致,根据右手准则,自转和公转方向同为正;当公转为逆时针方向时,与自转方向相反,根据右手准则,自转方向为正,公转方向为负。

图 6 为钻柱公转速度变化对钻柱内流体流动的影响剖面图,图 6(a)、图 6(c)、图 6(e)、图 6(g)、图 6(i)为钻柱自转和公转同向对应的剖面图,其余各图为钻柱自转和公转反向对应的剖面图。同向的公转速度越大,截面上的漩涡中心越靠近公转轴(横坐标 0 点),剖面整体越向左倾斜;三个速度剖面图即使不倾斜,形状上也不重合不类似,其中自转及公转速度都为 18.84 rad/s 的图形上凸最明显,这是因为速度核心区内最外围圆周在更大公转速度的带动下有更强烈的脱离速度核心区的趋势,致使速度核心区面积缩小但流速变大,而且此时自转和公转转速大小与方向都一致,达到同步状态,自转和公转耦合最强,自转效应最大地叠加到了公转效应形成的流场中,故形成的速度剖面形状是稳定的,不存在摆动现象;而对于未处于同步的状态,自转效应并没有完全叠加上去,削弱了速度剖面的上凸趋势,并使之变得相对平坦且不稳定,使剖面形状存在摆动,宏观表现就是钻柱内虽整体上是螺旋流,但由于不同步使速度核心区存在摆动,速度核心区形成了绕井眼中轴线的螺旋流场。图 6(b)中,自转和公转反向,不会出现同步状态,反向公转速度越大,截面上的漩涡越远离公转轴,整体剖面越向右倾斜。

图 6(c)、图 6(d)为分解去除自转和公转因素后仅考虑轴向速度的剖面,其形状与图 6(a)、图 6(b)相似,但没有偏斜。

图 6(e)、图 6(f)正负对称分布。由于边界层的

抵消作用,最右侧和最左侧的速度都减小为 0,到达公转轴位置时达到最大值。以公转角速度(包括大小和方向)作为基准,公转与自转的转速相差越大,则径向速度剖面图整体越大;若达到同步状态,钻井液各质点只有公转角速度,自转角速度相对公转角速度为 0,故剖面图整体数值上也最小。

图 6(g)中,同步状态时,横坐标 0 点与截面上的漩涡中心重合,该处对应的切向速度为最小值,对应在横截面上即以公转轴为对称轴向四周辐射,距离公转轴越远,自转、公转叠加后的角速度转换成的切向速度就越大;非同步状态时,切向速度最小值随着公转速度的变小将右移,远离横坐标 0 点,自转、公转叠加后的角速度转换成的切向速度也越小。图 6(h)是反向公转,漩涡出现在远离公转轴的一侧,因此自转、公转叠加后切向速度的最大值出现在远离漩涡中心而靠近公转轴的壁面附近,且反向公转角速度越大,叠加后得到的切向速度值越大。

图 6(i)、图 6(j)整体上呈单峰分布。图 6(i)说明自转和公转同向时,公转速度越接近于自转速度表观黏度越大,速度核心区内表观黏度的增大最为明显,当同步时表观黏度将增大到最大。图 6(j)中,随公转速度绝对值的增大,公转速度与自转速度相差越大,表观黏度越小,速度核心区内表观黏度的减小最为明显。

2.2.2 自转速度对钻柱内流场的影响

研究自转速度变化对流动的影响,可得出如下结果:合速度、轴向速度剖面形状变化的相关解释与图 6(a)~(d)相似;随着自转速度的增大,流场旋转效应增强,径向速度绝对值变大,图形整体变大;切向速度沿径向的绝对值增大,图形整体上越倾斜;自转与公转无论是同向还是反向,都表现为自转角速度增大,剪切速率增大,表观黏度变小,速度核心区内表观黏度的减小最明显。

2.2.3 轴向速度对钻柱内流场的影响

轴向速度变化对于涡动钻柱内流体流动产生的影响与普通管流大致相同。轴向速度的增大会使表观黏度剖面明显减小,同时不对径向流速和切向流速产生影响。

2.2.4 密度对钻柱内流场的影响

密度变化对各速度剖面几乎不产生影响,但能对表观黏度产生影响。随着密度的增大,表观黏度

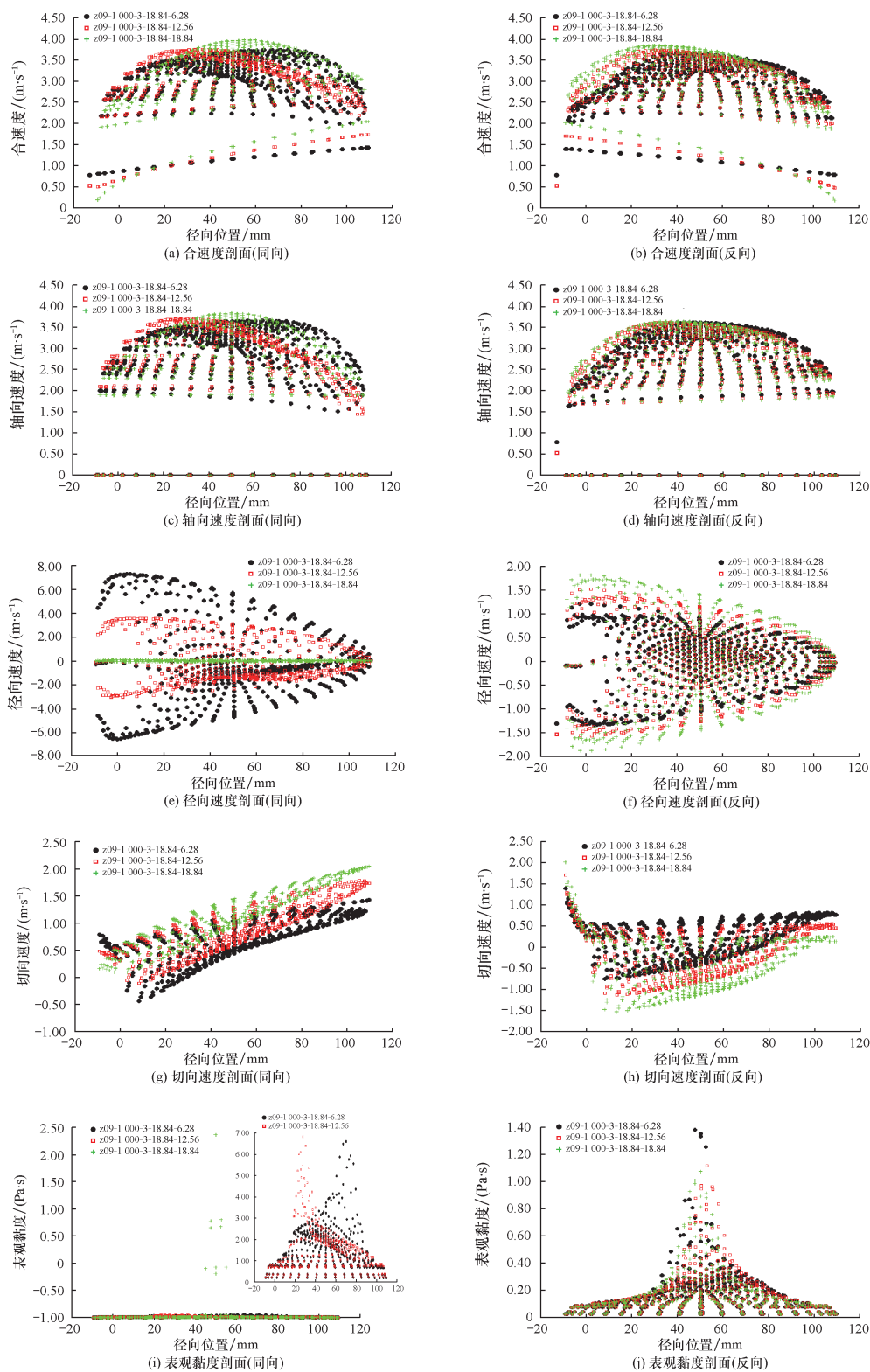


图6 公转速度变化对流动的影响

Fig. 6 Impact of revolution speed variation on flow field

将增大,速度核心区内表观黏度的增大较为明显。

2.3 涡动钻柱内的摩阻压耗特性分析

涡动钻柱内钻井液的流动主要有轴向流动、随

钻柱内壁自转的旋转流动以及随钻柱公转的旋转流动,这3种流动耦合在一起,表现出复杂的摩阻压耗变化规律。另外,由于流场数值模拟边界条件及相关设置相当复杂,使数值模拟计算结果收敛困难。

为了尽可能揭示摩阻压耗的变化规律,残差收敛标准无需设定得特别小,根据前期的试算分析,建议将残差收敛标准设定为 1.0×10^{-5} 。

图 7 为按照式(2)计算出的 15 m 长钻柱内的压耗曲线,其中,横坐标标准的正负表示公转方向的正反,横坐标 0 点所对应的摩阻压耗为钻井液流过无旋转钻柱内的摩阻压耗。将 0 点的摩阻压耗值与曲线上的其他值作比较,从中可以看出自转和公转对摩阻压耗的影响是比较复杂的。随着轴向流速和密度的增大,摩阻压耗整体增大,这与无旋转钻柱内的摩阻压耗变化规律相一致。当密度不变时,随着轴向流速的增大,自转和公转对摩阻压耗的影响不同,与 0 点无旋转运动钻柱内的摩阻压耗比较,有减小

的情况也有增大的情况,但增大的情况居多。这主要是因为,流场的自转和公转引起的旋转效应和轴向流动之间是相互制约的,三者之中不同运动参数相互搭配,当摩阻压耗增大的因素占据主导地位时整体就呈现增大的情况,反之呈现出减小的情况。另外,当密度、轴向速度及自转速度不变时,随着公转速度的正向增大(反向减小),公转与自转的角速度相差越小,摩阻压耗曲线整体呈下降趋势,说明公转速度增大摩阻压耗有减小的趋势;当密度、轴向速度及公转速度不变时,随着自转速度的增大,摩阻压耗曲线整体上呈增大趋势,说明自转速度增大时摩阻压耗有增大的趋势。

从图 7 中摩阻压耗的数值来看,将涡动钻柱内

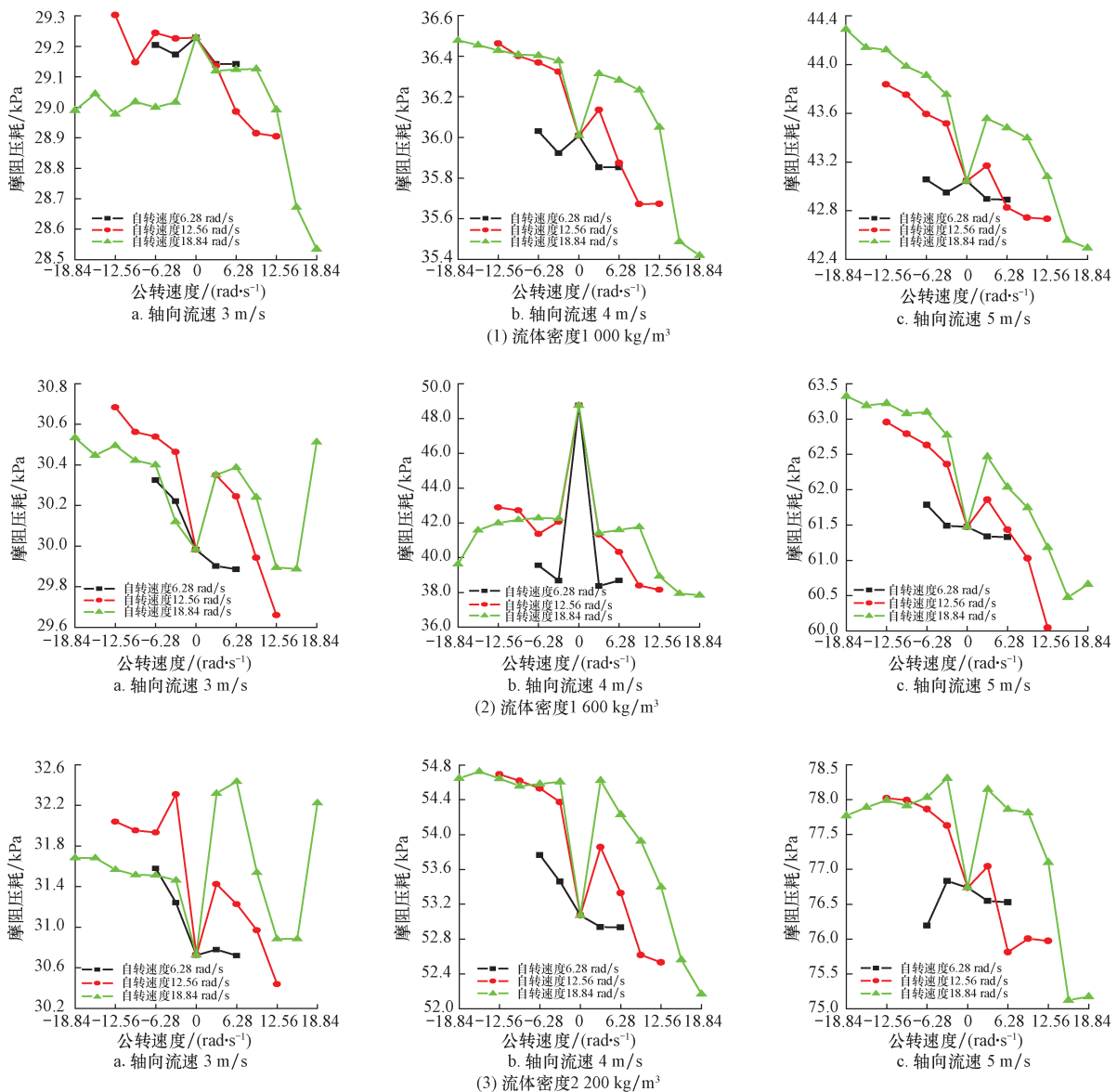


图 7 不同流场参数下的摩阻压耗曲线

Fig. 7 Friction pressure loss curves with different flow field parameters

的摩阻压耗与静止钻柱内的摩阻压耗(横坐标0点对应的摩阻压耗值)作比较,前者是在一个范围内波动的,后者则是一个确定的数值。以该数值为基准做一个简单估算:假设钻柱长6 000 m,那么相同流动参数下,考虑涡动后摩阻压耗的波动范围将达到0.5~2.0 MPa,根据钻井水力学理论,钻井液密度、黏度和排量以及钻柱尺寸的变化等都会对该波动幅度产生较大影响。该波动对于钻井液循环系统来说相对较大,若忽略会对整个循环系统产生较大影响,充分运用这一规律能够提高钻井效率,降低钻井成本。不过,由于目前理论和研究方法的限制,对于涡动钻柱内摩阻压耗规律的分析还需不断完善。

3 结论与建议

1) 涡动钻柱内的流体流场速度核心区围绕钻柱中轴线形成螺旋线结构。公转与自转同向且二者相差越小,横截面上的漩涡越靠近公转轴,合速度剖面整体左偏,达到同步后漩涡中心与公转轴重合;公转与自转反向且二者相差越大,横截面上的漩涡越远离公转轴,合速度剖面整体右偏。自转速度增大,会使径向速度、切向速度变大,表观黏度减小;流体密度增大对各分量速度几乎不产生影响,但表观黏度将会增大。

2) 涡动钻柱内流体流动产生的摩阻压耗,随自转速度与公转速度的变化在一定范围内连续变化,当密度、轴向速度不变时,随着公转速度的正向增大、反向减小或自转速度的减小,都将缩小公转与自转速度的差值,越接近于同步状态,对应的摩阻压耗越小。

3) 以相同条件下6 000 m长静止钻柱内的摩阻压耗为基准,涡动产生的摩阻压耗将在此基础上有0.5~2.0 MPa的波动,利用这一规律可设计、优化钻井液循环系统,对安全、高效钻井有重要意义。

4) 考虑钻柱涡动的钻井液流动更接近于真实情况,由此得到的相关流动与压耗模型也更合理。建议进一步开展非牛顿钻井液流体各流变参数变化规律的研究,以促进控压钻井的精细化。

参考文献

References

[1] 史玉才,王军,朱江,等.下部钻柱反向涡动机理研究[J].石油

钻探技术,2007,35(5):43-45.

Shi Yucai, Wang Jun, Zhu Jiang, et al. Research on backward whirling mechanism of bottom drillstring[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2007, 35(5): 43-45.

[2] 高德利. 钻井科技发展的历史回顾现状分析与建议[J]. 石油科技论坛, 2004(2): 29-39.

Gao Deli. Drilling technology development analysis historical review and recommendations[J]. Oil Frum, 2004(2): 29-39.

[3] 管志川,史玉才,夏焱,等.底部钻具组合运动状态及钻进趋势评价方法研究[J]. 2005, 33(5): 24-27.

Guan Zhichuan, Shi Yucai, Xia Yan, et al. Research on motion state of bottom hole assembly and the evaluation method of drilling tendency[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2005, 33(5): 24-27.

[4] 高德利. 油气井管柱力学与工程[M]. 东营: 中国石油大学出版社, 2006: 183-188.

Gao Deli. Down-hole tubular mechanics and its applications [M]. Dongying: China University of Petroleum Press, 2006: 183-188.

[5] Herschel W H, Bulkley R. Measurement of consistency as applied to rubber-benzene solutions; 29th Annual Meeting of the American Society Testing Materials Atlantic City, June 1926 [C]. Proc. ASTM, 26 (II): 621-633.

[6] 胡茂焱,尹文斌,郑秀华,等.钻井液流变参数计算方法的分析及流变模式的优选[J]. 探矿工程: 岩土钻掘工程, 2004, 31(7): 41-45.

Hu Maoyan, Yin Wenbin, Zheng Xiuhua, et al. Analyses on calculation methods of rheological parameters of drilling fluid and optimization of rheological model[J]. Exploration Engineering: Rock & Soil Drilling and Tunneling, 2004, 31(7): 41-45.

[7] 韩洪升,魏兆胜,崔海清,等.石油工程非牛顿流体力学[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1993: 116-145.

Han Hongsheng, Wei Zhaosheng, Cui Haiqing, et al. Non-newtonian fluid mechanics in petroleum engineering[M]. Haerbin: Harbin Institute of Technology Press, 1993: 116-145.

[8] 张晋凯,李根生,黄中伟,等.连续油管螺旋段摩阻压耗数值模拟[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2012, 36(2): 115-119.

Zhang Jinkai, Li Gensheng, Huang Zhongwei, et al. Numerical simulation on friction pressure loss in helical coiled tubing[J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2012, 36(2): 115-119.

[9] 韩占忠,王敬,兰小平. FLUENT: 流体工程仿真计算实例与应用[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2005: 14-16.

Han Zhazhong, Wang Jing, Lan Xiaoping. FLUENT: fluid engineering simulation and applications [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2005: 14-16.

[10] 高学平. 高等流体力学[M]. 天津: 天津大学出版社, 2005: 16-28.

Gao Xueping. Advanced fluid mechanics [M]. Tianjin: Tianjin University Press, 2005: 16-28.

[11] 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: 122-126.

Wang Fujun. Computational fluid dynamics analysis: software principles and applications of CFD [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 122-126.

[12] 汪志明,崔海清,何光渝. 流体力学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2006: 126-160.

Wang Zhiming, Cui Haiqing, He Guangyu. Fluid mechanics [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2006: 126-160.

[13] Ito S, Ogawa K, Kuroda C. Decay process of swirling in a pipe[J]. International Journal of Chemical Engineering, 1979: 600-605.

[编辑 令文学]