

分流式自动垂直气体钻井工具设计

赵金海^{1,2,3}

(1. 中国石化石油勘探开发研究院,北京 100083;2. 中国石油大学(北京)石油天然气工程学院,北京 昌平 102249;3. 中国石化石油工程技术研究院,北京 100101)

摘 要:Power V 自动垂直钻井系统等主动防斜打直技术已在钻井液钻井中得到了广泛应用,但气体钻井过程中也容易发生井斜,由于气体钻井过程中钻柱内外压差较低,无法开启现有垂直钻井工具的推靠机构,目前还没有成熟的气体钻井主动防斜打直技术。随着气体钻井技术在国内深井超深井提速中的广泛应用,急需研发适用于气体钻井的自动垂直钻井系统。根据钻井液钻井的自动垂直钻井系统基本原理,利用气体动力学特点,设计了一种分流式自动垂直钻井工具。该钻井工具基于气体动力学原理和流固耦合分析方法,利用分流气体方法,将分流喷射的反作用力用于调节钻头侧向力,实现了自动感应井斜及纠斜,达到了垂直钻井的目的。理论分析证明,利用该钻井工具可以实现气体自动垂直钻井。

关键词:气体钻井;垂直钻井;物理模型;流场;压力分布
中图分类号:TE242.6 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0890(2010)06-0015-05

The Design of a Lateral-Jet Type Automatic Vertical Gas Drilling Tool

Zhao Jinhai^{1,2,3}

(*Petroleum Exploration and Production Research Institute, Sinopec, Beijing, 100083, China; College of Oil & Gas Engineering, China University of Petroleum, Changping, Beijing, 102249, China; 3. Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing, 100101, China*)

Abstract: Power V system, an active control automatic vertical drilling technology, is widely used in drilling using drilling fluid, while borehole inclination easily happens during gas drilling process. The side-wall contact devices of vertical drilling tool can't open because of the small differential pressure between inside and outside drilling string. There is no proven active inclination control technology for gas drilling at present. With the widely use of gas drilling technology in domestic ultra-deep well, automatic vertical gas drilling system is highly needed. According to the theory of automatic vertical drilling system in mud drilling and characteristics of gas dynamics, a lateral-jet type automatic vertical gas drilling system is developed. Based on gas dynamics and fluid-solid coupling analysis, the automatic sensing and correction was realized using the reverse force of gas lateral jet flow. The automatic vertical gas drilling was achieved. The analysis proves that this tool can be used for automatic vertical gas drilling.

Key words: gas drilling; vertical drilling; physical model; flow field; pressure distribution

1 概 述

自旋转钻井发明以来,防斜打直一直是直井钻井的主要难题之一。20 世纪五六十年代^[1-5],直井井斜问题受到高度重视,开始使用大尺寸钻铤和稳定器,刚性满眼钻具组合和钟摆钻具组合等也广泛应用于直井的防斜纠斜。20 世纪 90 年代后,随着定向井、水平井技术的发展,随钻测斜技

收稿日期:2010-05-09;改回日期:2010-11-06
基金项目:国家高技术研究发展计划(“863”计划)项目“超深井钻井技术研究”(编号:2006AA06A109)部分研究成果
作者简介:赵金海(1970—),男,山东临沂人,1993 年毕业于西南石油学院钻井工程专业,1996 年获西南石油学院油气井工程专业工学硕士学位,2000 年获西南石油学院油气井工程专业工学博士学位,副所长,教授级高级工程师,主要从事钻井工艺方面的研究工作。
联系方式:(010)84988310, zhaojh@sripe.cn

术的不断完善和螺杆钻具的出现,国外更多利用“滑动导向钻具组合+MWD”连续导向技术进行直井的防斜打直作业。与此同时,主动式防斜打直技术取得重大突破,研制了自动垂直钻井系统(VDS)^[5],并通过德国的大陆超深井计划(KTB计划)^[6]使VDS逐步完善。Baker Hughes公司推出了VertiTrak系统^[7],其导向部分推靠机构相对井壁不旋转,以推靠式实现自动垂直导向钻井。Schlumberger公司研发了Power V垂直钻井系统^[8],该系统的最大特点是导向推靠机构在与钻具同步旋转钻进的方式下可实现自动垂直钻井,其导向方式为指向式。

进入21世纪,国内主要引进国外垂直钻井系统进行防斜打直,如龙深1井、秋南1井、川科1井^[9]等采用了VertiTrak垂直钻井系统,黑池1井^[10]、砂新2井、游6井等采用了PowerV垂直钻井系统。同时,国内的专家学者也进行了大量垂直钻井系统的理论研究^[11-12],胜利石油管理局钻井工艺研究院研发了机械式自动垂直钻井系统^[13]和捷联式自动垂直钻井系统^[14-15],先后在坨181井、分2井及宁深1井进行了成功应用,打破了国外大公司对该

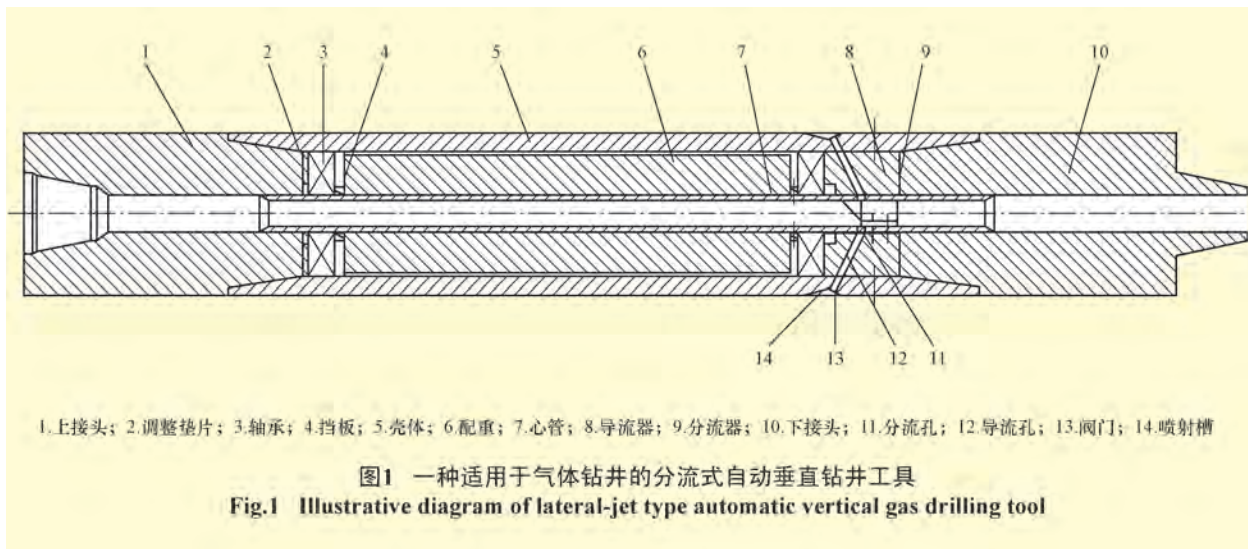
项技术的垄断,充分展示了我国自动垂直钻井技术的水平。

气体钻井过程中容易发生井斜,但出于井下安全等因素的考虑,很少利用稳定器调节下部钻具组合的性能来实现防斜、纠斜,因而缺乏有效的防斜纠斜技术手段。由于气体钻井过程中循环介质为气体,上述应用于液相钻井的自动垂直钻井系统需要将钻井液的压差转换为导向推靠力,不适合在气体钻井中应用。因此,开展适用于气体钻井的自动垂直钻井技术研究有着极其重要的意义。

2 分流式自动垂直钻井工具设计

受火箭、飞机反推制动、消防水龙头等的启发,笔者提出了一种适用于气体钻井的分流式自动垂直钻井工具(如图1所示)^[12]。

该钻井工具基于气体动力学原理和流固耦合分析方法,利用分流气体方法,将分流喷射的反作用力用于调节钻头侧向力,实现自动感应井斜及纠斜,达到垂直钻井的目的,是一种用于气体钻进过程的自动防斜钻井工具。



装配时,先在轴承及心管两端添加润滑脂,然后将上接头、壳体及下接头用螺纹连接;轴承分别安装在挡板两侧,与心管过盈配合;配重焊接在两挡板中间,与心管上分流孔的相差为 180° ;导流器用螺钉固定于心管内,斜面正对心管上分流孔;分流器以螺钉固定在壳体上,其上的导流孔与壳体上的喷射槽对齐;调整垫片安装在心管上部,以调整及保持轴承;阀门固定在壳体上,更换阀门可以调节喷射直径,从而改变喷射气流产生反作用力的大小。该工

具采用重力感应井斜原理进行自动感应及自动纠斜,不需要增加任何操作。

3 工作原理及特点

进行直井气体钻井施工时,首先计算所需要的喷射孔直径,然后选择阀门大小,并按照上述方法装配工具。工具装配完成之后安装在钻具组合中,且尽量靠近钻头。当井斜角小于 2° 时,心管与轴承、

导流器、上接头、下接头之间的环向摩擦力使配重保持一恒定位置,配重随着钻柱的旋转而转动,若气流通道(壳体的喷射槽、导流器的导流孔及心管的分流孔)连通,则气流随着钻柱的转动而转动喷射,若上述气流通道没有连通,环空也不会有气流流入。在这两种情况下,自动垂直钻井工具可以起到稳斜的作用。当井斜角大于 2° 时,钻柱转动时,心管与轴承、导流器、上接头、下接头之间的环向摩擦力不能使配重保持一恒定位置,受重力作用的影响,配重始终自动保持在井眼低边,心管上的分流孔始终自动指向井眼高边。随着钻柱的转动,壳体上的喷射槽、导流器上的导流孔及心管上的分流孔连通时,通过分流器部分气体经分流孔、导流孔、阀门及喷射槽直接喷向井眼高边,在气流喷射反作用力作用下,近钻头钻具可保持在井眼低边,使钻头产生降斜力,实现自动垂直钻井。

安装在壳体上的阀门为单向阀,它不仅可调节喷射口的大小,而且在起、下钻停止循环时能防止井内的杂物进入垂直钻井工具。导流器上的导流孔及壳体上的喷射槽均朝斜上方向,以便喷射时能产生反作用力及有助于气体携岩。心管两端分别插入上接头及下接头,因其存在一定量的间隙,间隙中加入润滑脂,不仅可以减小心管转动时产生的摩擦力,而且也能很好地密封轴承,保证轴承的工作性能,提高其工作寿命。

- 该分流式自动垂直钻井工具的特点是:
- 1) 适用范围广,通过更换阀门可以改变喷射直径,进而调节喷射气流产生的反作用力;
 - 2) 操作方便,利用重力感应井斜原理进行自动感应及自动纠斜,不需要增加任何操作;
 - 3) 采用机械式结构,结构简单、稳定性好。

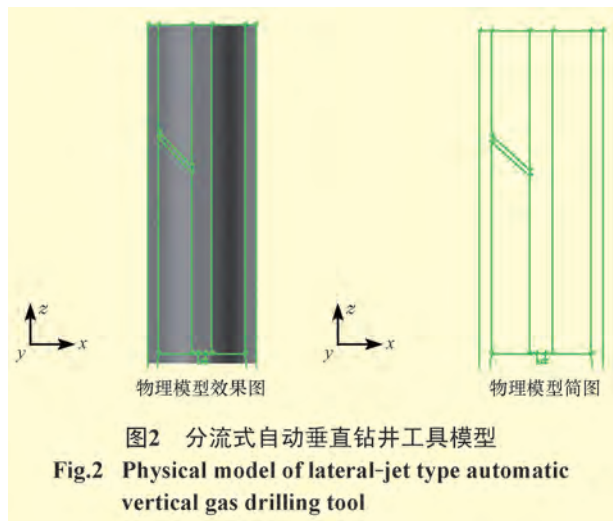
4 流场分布及侧向力计算

为分析分流式自动垂直钻井工具的可行性,以气体动力学为理论依据,采用流固耦合技术、现代CAE(计算机辅助工程)技术对气体钻井条件下的流场特点及产生的侧向力进行了分析。

4.1 模型的建立

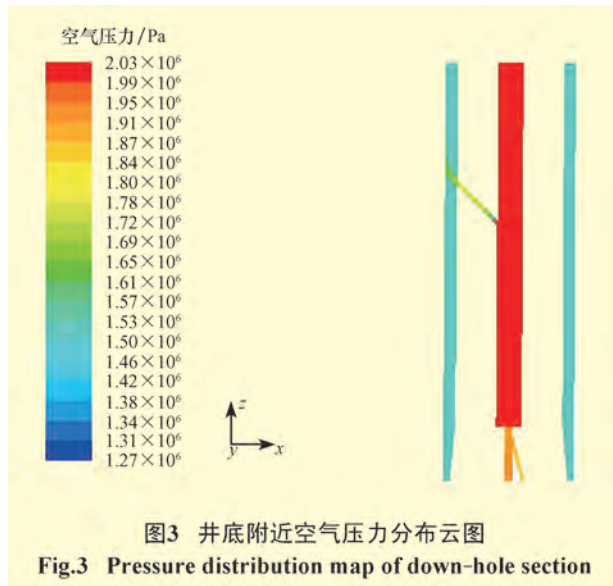
自动垂直钻井工具的物理模型见图 2。具体参数为:模型高 2.0 m;工作井深 2 000 m;工具中心直径 60 mm,外径 254 mm;井眼直径 311.1 mm;钻头水眼包括 $\phi 20.0\text{ mm}\times 1$ 个、 $\phi 25.0\text{ mm}\times 5$ 个;侧面

导流孔直径 15 mm,与铅垂线夹角 $30^{\circ}\sim 60^{\circ}$;假设循环介质为空气。



4.2 气体流场分布

井底附近和喷流槽处空气压力分布云图见图 3、图 4。从图 3、图 4 可以看出,在气体钻井中,钻具内部与环空有一个压力差,即钻头的压力损耗,由于从工具喷流槽中喷出的气体压力(可达 1.82 MPa)比环空中的压力高很多,由此会对井壁产生作用力,反过来钻具也会受到侧向推靠力。



井底附近空气流速和喷流槽处空气流速云图见图 5、图 6。从图 5、图 6 可以看出,气体刚进入喷流槽前端时速度最快,从喷流槽喷出时达到 700 m/s,如此高的速度会对井壁产生作用力,反过来钻具也会受到侧向推靠力,从而达到垂直钻进的目的。

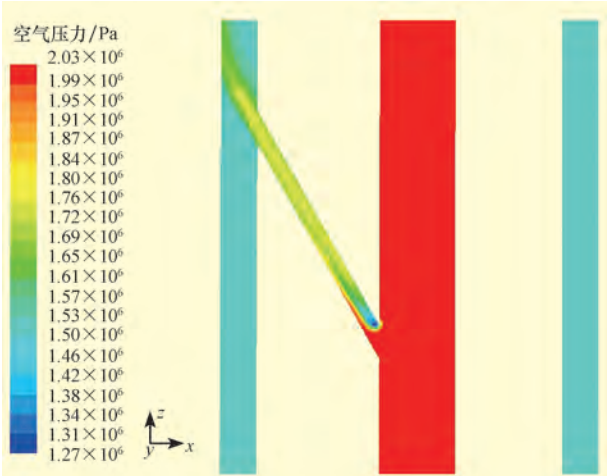


图4 喷流槽处空气压力分布云图

Fig.4 Pressure distribution map outside of side-blow nozzle

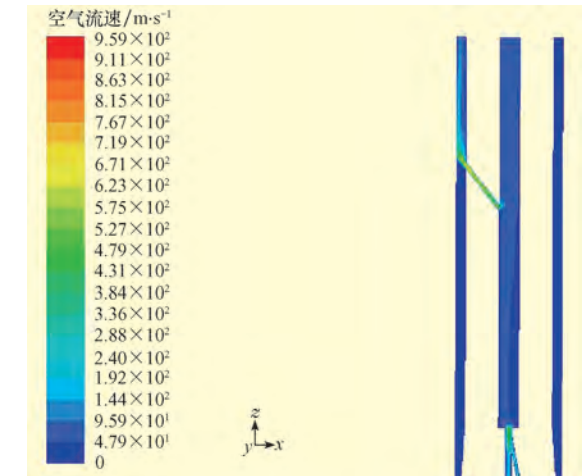


图5 井底附近空气流速分布云图

Fig.5 Velocity distribution map of down-hole section

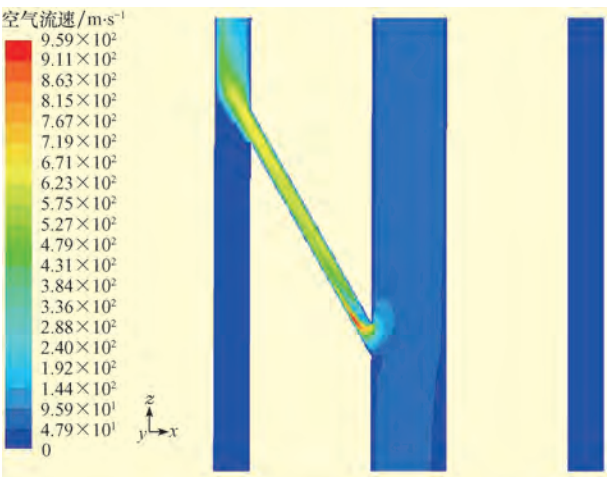


图6 喷流槽处空气流速分布云图

Fig.6 Velocity distribution map outside of side-blow nozzle

4.3 喷流槽处井壁面上气体压力分布

喷流槽处壁面上的压力云图见图7。从图7可以看出,井壁和钻柱外壁都会受到压力的作用,井壁受到的压力来源于喷流槽中喷出的气流,气流也会受到井壁的反作用力,由此对钻柱外壁产生侧面推靠力。如果知道气流受力的大小,也会得到钻柱外壁所受推靠力的大小。

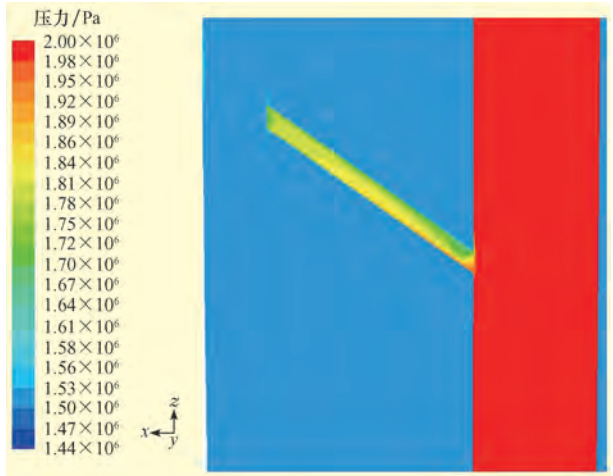


图7 喷流槽处壁面上的压力分布

Fig.7 Pressure distribution map on the wall of side-blow nozzle

4.4 推靠力分析

在建立模型的过程中,入口边界条件的压力为2 MPa,流量为2 m³/s(标准状况)。在该状况下,可以认为空气流体为可压缩的黏性流体。空气从喷流槽中喷出有两种流动状态,即喷流槽的射流状态和稳定射流情况下的尾流状态,只是尾流的固体半径较大。

圆形紊动射流的控制方程为:

$$u_x = \frac{3}{8\pi} \frac{K'}{\nu_0 x} \frac{1}{\left(1 + \frac{1}{4}\xi^2\right)^2} \quad (1)$$

$$u_r = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{3}{\pi}} \frac{\sqrt{K'}}{x} \frac{\left(\xi - \frac{1}{4}\xi^2\right)}{\left(1 + \frac{1}{4}\xi^2\right)^2} \quad (2)$$

其中,

$$K' = \frac{J}{\rho} \quad (3)$$

$$\xi = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{3}{\pi}} \frac{\sqrt{K'}}{\nu_0} \frac{r}{x} \quad (4)$$

尾流阻力 D 可表示为:

$$D = h\rho \int_{-\infty}^{\infty} u(U_{\infty} - u)dy \quad (5)$$

式中: u_x 为轴向流速分量, m/s; ν_0 为运动黏度, m^2/s ; u_r 为径向流速分量, m/s; J 为射流的动量通量, 常数; ρ 为流体密度, kg/m^3 ; r 为径向距离, m; x 为轴向距离, m; h 为圆柱体长度, m; U_{∞} 为无穷远处流速, m/s; u 为流体流速, m/s; y 为单位长度, m。

利用式(1)~(5)计算出流体受到的尾流阻力为 6.9 kN, 其反作用力即钻柱受到的侧向推靠力也为 6.9 kN。由此可知, 利用侧向推靠力可以达到向井眼低边推靠钻具实现降斜的目的。

5 认识及建议

1) 分流式自动垂直气体钻井工具结构相对简单, 如研制试验成功可以解决气体钻井防斜打直问题, 填补国内外在该项技术上的空白。

2) 理论分析证明, 利用分流式自动垂直气体钻井工具可以实现气体自动垂直钻井, 但仍需对工具结构进一步优化, 确定制造工艺和操作参数, 通过现场试验加以完善和改进。

3) 建议组织攻关研究, 进一步提高气体钻井的技术水平。

参 考 文 献

- [1] Lubinski A. A study of the buckling of rotary drilling strings [G]// American Petroleum Institute Division of Production. Drilling and Production Practice; 1950. New York: American Petroleum Institute, 1950:178-214.
- [2] Woods H B, Lubinski A. Use of stabilizers in controlling hole deviation [G]// American Petroleum Institute Division of Production. Drilling and Production Practice; 1955. New York: American Petroleum Institute, 1955:165-182.
- [3] Lubinski A, Woods H B. Factors affecting the angle of inclination and dog-legging in rotary bore holes [G]// American Petroleum Institute Division of Production. Drilling and Production Practice; 1953. New York: American Petroleum Institute, 1953:222-250.
- [4] Lubinski A, Althouse W S, Logan J L. Helical buckling of tubing sealed in packers [J]. Journal of Petroleum Technology, 1962, 14(6):665-670.
- [5] Oppelt J, Chur C, Feld D, et al. New concepts for vertical drilling of boreholes [R]. SPE/IADC 21905, 1991.
- [6] Emmermann R, Lauterjung J. The German continental deep drilling program KTB: overview and major results [J]. Journal of Geophysical Research, 1997, 102(B8):18179-18202.
- [7] Ligrone A, Oppelt J, Calderoni A, et al. The fastest way to the bottom: straighthole drilling device—drilling concept, design considerations, and field experience [R]. SPE 36826, 1996.
- [8] Calderoni A, Savini A, Treviranus J, et al. Outstanding economic advantages based on new straight-hole drilling device proven in various oilfield locations [R]. SPE 56444, 1999.
- [9] 薄和秋, 赵永强. VertiTrak 垂直钻井系统在川科 1 井中的应用 [J]. 石油钻探技术, 2008, 36(2):18-21.
Bo Heqiu, Zhao Yongqiang. Application of VertiTrak in Chuanke-1 Well [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2008, 36(2):18-21.
- [10] 刘以明, 蔡文军, 王平, 等. Power V 和机械式随钻测斜仪在黑池 1 井的应用 [J]. 石油钻探技术, 2006, 34(1):71-73.
Liu Yiming, Cai Wenjun, Wang Ping, et al. Application of Power V and mechanical inclinometer in Heichi 1 Well [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2006, 34(1):71-73.
- [11] 苏义脑, 李松林, 葛云华, 等. 自动垂直钻井工具的设计及自动控制方法 [J]. 石油学报, 2001, 22(4):87-91.
Su Yinao, Li Songlin, Ge Yunhua, et al. The design and control ways of the downhole automatic closed loop of vertical drilling tool [J]. Acta Petrolei Sinica, 2001, 22(4):87-91.
- [12] 刘白雁, 苏义脑, 陈新元, 等. 自动垂直钻井中井斜动态测量理论与实验研究 [J]. 石油学报, 2006, 27(4):105-109.
Liu Baiyan, Su Yinao, Chen Xinyuan, et al. Theoretical and experimental investigation on dynamic measurements of hole inclination in automatic vertical drilling process [J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27(4):105-109.
- [13] 郑锋辉, 韩来聚, 杨利, 等. 国内外新兴钻井技术发展现状 [J]. 石油钻探技术, 2008, 36(4):5-11.
Zheng Fenghui, Han Laiju, Yang Li, et al. Development of novel drilling technology [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2008, 36(4):5-11.
- [14] 韩来聚, 倪红坚, 赵金海, 等. 机械式自动垂直钻井工具的研制 [J]. 石油学报, 2008, 29(5):766-768.
Han Laiju, Ni Hongjian, Zhao Jinhai, et al. Development of mechanical tool for automatic vertical drilling [J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 29(5):766-768.
- [15] 王锡洲. 捷联式自动垂直钻井系统的研制及现场试验 [J]. 石油钻探技术, 2010, 38(3):13-16.
Wang Xizhou. Development and field test of automated strap-down vertical drilling system [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2010, 38(3):13-16.
- [16] 赵金海, 唐波, 唐代绪, 等. 一种适用于气体钻井的分流式自动垂直钻井工具: 中国, 200720158344.0 [P]. 2008-09-24.
Zhao Jinhai, Tang Bo, Tang Daixu, et al. A lateral-jet type automatic vertical gas drilling system: China, 200720158344.0 [P]. 2008-09-24.