

国内外旋转导向钻井系统导向原理

雷 静^{1,2}, 杨甘生¹, 梁 涛¹, 胡 驰³

(1. 中国地质大学(北京)科学钻探国家专业实验室, 北京 100083; 2. 中交四航工程研究院有限公司, 广东 广州 510230; 3. 中国地质大学(北京)工程技术学院, 北京 100083)

摘 要: 旋转导向钻井技术是目前世界上最具代表性和先进性的钻井技术, 该技术的核心是旋转自动导向系统。总结了国内外旋转导向钻井系统的发展概况, 对各系统的导向机构工作原理进行了对比分析, 并就旋转导向钻井系统未来的发展和完善提出了看法。

关键词: 旋转导向钻井系统; 导向原理; 系统结构; 偏置机构; 钻井工具

中图分类号: P634.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2012)09-0053-06

Steering Principles of Rotary Steerable Drilling Systems in China and Abroad/LEI Jing^{1,2}, YANG Gan-sheng¹, LI-ANG Tao¹, HU Chi³ (1. State Professional Lab of Scientific Drilling, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd., Guangzhou Guangdong 510230, China; 3. School of Engineering & Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: Rotary steerable drilling technology is the most representative and advanced drilling technology in the world, and the core of the technology is rotary steerable drilling system. This paper summarizes the development situation of rotary steering drilling systems in China and abroad and analyzes the working principle of each system's steering mechanism. The paper also presents the development and perfection of the rotary steerable drilling system in the future.

Key words: rotary steerable drilling system; steering principle; system structure; bias unit; drilling tool

国际上, 导向钻井技术先后经历了 3 个发展阶段: (1) 滑动导向钻井阶段; (2) 地面控制导向钻井阶段; (3) 旋转自动导向钻井阶段。自 20 世纪 80 年代末期, 国外就开始了旋转导向钻井系统的理论研究。目前, 已形成一系列较为成熟的旋转导向钻井系统。国内开展这方面的研究工作起步较晚, 20 世纪 90 年代中期才开始相关的研究工作。近几年, 研制出了相应的工具系统, 并在关键技术方面取得了突破^[1-5]。但与国外同类型工具相比, 在工作性能、自动化程度等方面仍存在一定差距。

1 旋转导向系统的分类

按照导向原理的不同, 可将现有旋转导向钻井系统划分为推靠钻头式 (Push The Bit) 和指向钻头式 (Point The Bit) 两大类。推靠钻头式是通过偏置机构 (Bias Units) 在钻头附近偏置钻头直接给钻头提供侧向力。指向钻头式是通过偏置机构直接或间接弯曲心轴使钻头指向井眼轨迹控制方向。同时, 偏置机构的工作方式又有 2 种: 静态偏置 (Static Bias) 和动态 (或调制式) 偏置 (Dynamic Bias)。静态

偏置式是指偏置机构在钻进过程中不与钻柱一起旋转, 可在某一方向上固定提供侧向力; 动态式是指偏置机构在钻进过程中与钻柱一起旋转, 依靠控制系统使其在某一位置产生定向周期性的侧向力^[6-8]。

综合考虑导向方式和偏置方式, 可以更全面、更准确地将旋转导向钻井系统按其井下工具系统的工作方式分为 4 种: 静态偏置推靠式、动态偏置推靠式、静态偏置指向式和动态偏置指向式。目前, 还没有成型的动态偏置指向式系统, 国内外已开发和应用的其他 3 种旋转导向钻井系统如表 1 所示。

2 静态偏置推靠式旋转导向钻井系统

目前世界上已成形的静态推靠式旋转导向钻井系统主要有 Baker Hughes Inteq 公司开发的 AutoTrak RCLS 和 Noble Technology Ltd 的子公司德国 D. M. T Welldown Drilling Service GmbH 开发的 Well Director 两种。国内由中海油与西安石油学院等研究单位承担的国家“863”课题“可控 (闭环) 三维轨迹钻井技术”也取得了突破, 所研究设计的可控偏心器式旋转导向钻井工具系统属于静态偏置推靠式。

收稿日期: 2012-04-12

基金项目: 国土资源部基金项目“页岩气调查及勘探开发钻井技术研究”(2009GYXQ15-11-03)

作者简介: 雷静 (1987-), 男 (土家族), 湖南人, 中国地质大学 (北京) 硕士研究生, 中交四航工程研究院有限公司, 钻井工程专业, 从事钻探工具设计和工艺研究工作, 北京市海淀区学院路 29 号, lejingcugb@hotmail.com。

表1 国内外已经开发的旋转导向钻井系统

所属公司	系统名称	工作方式	现状
Baker Hughes Inteq	AutoTrak RCLS	静态偏置推靠式	1997年商用
Noble Corp. NDT	Well Director、Express Drill	静态偏置推靠式	2004年商用
3D Stabilizers	3D Stabilize	静态偏置推靠式	被 Pathfinder 收购
Validus International LLC	NAS/DS AUTOGUIDE	静态偏置推靠式	2006年应用
Amoco Production Company	The Side Winder	静态偏置推靠式	2000年试用
中国海洋石油集团公司	可控偏心器式旋转导向钻井工具系统	静态偏置推靠式	2006年试用,现开发和完善中
Precision Drilling Corporation	Revolution	静态偏置指向式	2005年被 Weatherford 收购
Gyro-Data Drilling Automation Ltd	Well-Guide RSS	静态偏置指向式	已投入商用
Pathfinder Energy Services Inc	PathMaker	静态偏置指向式	2003年商用
Tera Vici Drilling Solutions	Tera Vici X2	静态偏置指向式	计划2005年商用
Cambridge Drilling Automation Ltd	AGS	静态偏置指向式	1993年研制,现与 Gyro-Data 合并
JNOC	RCDOS	静态偏置指向式	现与 Sperry-Sun 合并
Smart Stabilizer System Ltd	Smart Stabilizer System	静态偏置指向式	2001年被 Precision 收购
Directional Drilling Dynamics Co	Contra-Nutating System	静态偏置指向式	开发中
Halliburton Sperry-Sun	Geo-Pilot EZ-Pilot	静态偏置指向式	1998年商用 2006年商用
Rotary Steerable Tools LLC	SmartSleeve RST	静态偏置指向式	与 Shell 合并,已投入商用
Schlumberger Anadrill	Power Drive SRD Power Drive Xceed	动态偏置推靠式 静态偏置指向式	1998年商用 2002年商用
Camoco international Inc	SRD	动态偏置推靠式	1994年应用,现与 Schlumberger 合并
中国石油化工集团公司	MRSS	动态偏置推靠式	2008年试用,现开发和完善中

2.1 Baker Hughes Inteq 的 AutoTrak RCLS

AutoTrak RCLS 系统的井下导向工具系统由不旋转外筒和旋转心轴 2 大部分组成。旋转心轴上接钻柱,下接钻头,起传递钻压、扭矩和输送钻井液的作用。不旋转外筒上设置有井下 CPU,测控系统,液压系统和偏执执行机构。导向机构如图 1 所示。

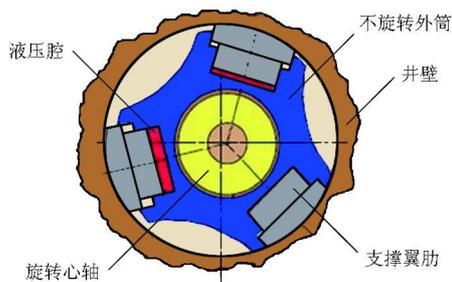


图1 AutoTrak RCLS 系统导向机构

井下钻进时,周向均布的 3 个支撑翼肋分别以不同的液压力支撑于井壁,将使不旋转外筒不随钻柱一起旋转,同时井壁的反作用力将对井下导向工具产生一个稳定的偏置合力,从而改变钻头的钻进方向。该系统有独立的液压系统为支撑翼肋的支出提供动力,通过井下 CPU 控制 3 个支撑翼肋的支出液压的大小,达到控制偏置合力的大小和方向的目的。这样既可以调节井眼轨迹方向,也可以调节造斜率的大小,从而实现控制导向钻井。井下 CPU 在下井之前,预置了井眼轨迹数据,在其工作时,可将 MWD 测量的井眼轨迹信息或 LWD 测量的地层信

息与设计数据进行对比,自动产生控制命令;也可按照地面指令来控制液压系统的液压力。

2.2 Noble Corp. NDT 的 Well Director 和 Express Drill

Well Director 系统的井下工具系统主要由旋转驱动心轴和不旋转外筒 2 大部分组成。不旋转外筒内部设计有井下微处理器,传感器电子短节,液压导向执行机构,其中液压导向执行机构包括控制阀和活塞驱动的导向翼肋,共 4 个导向翼肋。由于 AutoTrak RCLS 系统和 Well Director 系统都源于德国 KTB 项目开发的直井钻井系统,所以这 2 种系统工作原理类似^[8]。Express Drill 系统在 Well Director 的基础上做了部分的改进,最大的特点就是实现了结构的模块化,使得该系统更容易拆装和维护保养,更能满足实际钻井的需要。

2.3 中国海洋石油集团公司的可控偏心器式旋转导向钻井工具系统

可控偏心器旋转导向钻井工具主要由驱动轴、不旋转外套、导向机构、定位总成、测控单元、信号传输滑环、轴承支撑系统和密封系统等构成。其中导向机构由 3 个互成 120° 角的翼肋及驱动液缸组成,液动力来源于钻井液,3 个翼肋可独立伸出或缩回(如图 2 所示)。

在钻进过程中,钻井液通过驱动轴上的小孔进入翼肋驱动液缸。在钻柱内外钻井液压差的作用

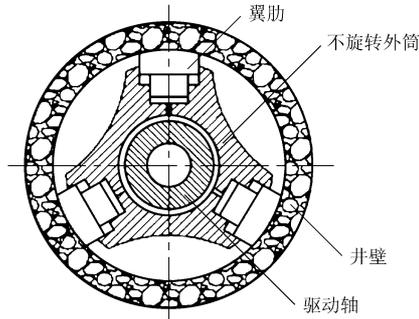


图2 可控偏心器式旋转导向系统导向机构

下,3个翼肋被驱动而伸出,并与井壁相接触。3个翼肋伸出时在钻具的相应位置形成一个偏心位移矢量,使可控偏心器轴线偏离井眼中心线。通过调整3个翼肋的偏心位移矢量,可形成不同的工具面角和弯接头弯角,实现导向钻进。钻井过程中,工程参数探测器不断将测量数据发送到地面监控系统中,当地面监控系统分析数据后,判断应该改变当前偏心矢量时,就通过下行通道发出调整命令,由测控单元和翼肋定位机构执行相应的操作。这一导向控制

模式与贝克休斯公司的 AutoTrak 旋转闭环钻井工具通过在3个翼肋上施加不同的压力形成导向力矢量来控制井眼轨迹的导向控制模式有着本质的差别^[9]。

3 动态偏置推靠式旋转导向钻井系统

目前世界上已成形的动态推靠式旋转导向钻井系统主要有 Schlumberger Anadrill 公司的 Power Drive SRD 系统以及中国石油化工集团公司组织研究设计的 MRSS 系统。

3.1 Schlumberger Anadrill 的 Power Drive SRD

Power Drive SRD 系统主要由测控稳定平台和偏置执行机构组成。测控稳定平台内部包括测量传感器、井下 CPU 和控制电路,通过上下轴承悬挂于外筒内。整个工具系统在随钻柱一起旋转时,稳定平台通过控制其两端的扭矩发生器输出的扭矩大小,使稳定平台不随钻柱一起旋转,处于一种随动稳定状态(如图3所示)。

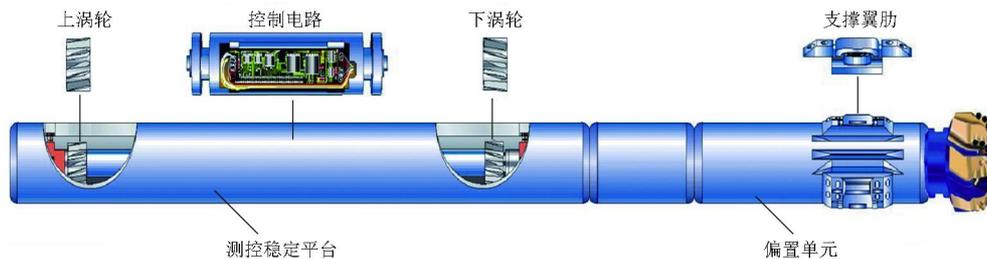


图3 Power Drive SRD 系统结构

井下导向工作时,稳定平台控制上盘阀的相对稳定,而随钻柱一起旋转的下盘阀上的液压孔将依次与上盘阀上的高压孔接通,钻柱内部的高压钻井液通过该临时接通的液压通道进入相关的翼肋支撑液压腔,在钻柱内外钻井液的压差作用下,翼肋被支出。这样,随着钻柱的旋转,每个支撑翼肋都将在相同位置支出,从而为钻头提供一个侧向力,产生导向作用。

导向工具,该工具主要由测控短节、偏置导向执行机构两大部分组成。测控短节内部安装有稳定平台,要包括:空间姿态测量系统、井下微电脑、控制电路及供电机构(上下涡轮发电机)。偏置导向执行机构主要包括液压分配机构、翼肋伸缩机构及对应的高/低压孔。测控短节通过一控制轴与偏置导向执行机构相联接,用于控制偏置执行机构(如图4所示)。

3.2 中国石油化工集团公司的 MRSS

MRSS 旋转导向钻井系统的核心是 MRST 旋转

该系统的工作原理类似 Power Drive SRD 系统。其主要特征是导向机构随钻柱一起旋转,相对井壁

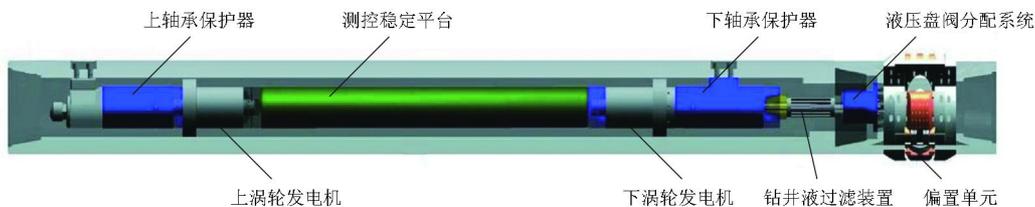


图4 MRST 旋转导向工具结构

没有静止支撑点。钻柱内外的钻井液压差为翼肋伸缩机构的伸缩提供动力,并由液压分配机构分配。需要导向时,高压钻井液由上盘阀的弧形高压孔进入液压盘阀分配系统,通过控制与下盘阀某低压孔导通进入与其相连的支撑翼肋液压腔,该支撑翼肋将被高压钻井液推动伸出支撑于井壁,产生偏置力,推动钻头偏离原方向,从而实现导向钻进^[10]。

4 静态偏置指向式旋转导向钻井系统

目前世界上已经成形的静态偏置指向式旋转导向钻井系统近 10 种,国内尚无此类成型的旋转导向

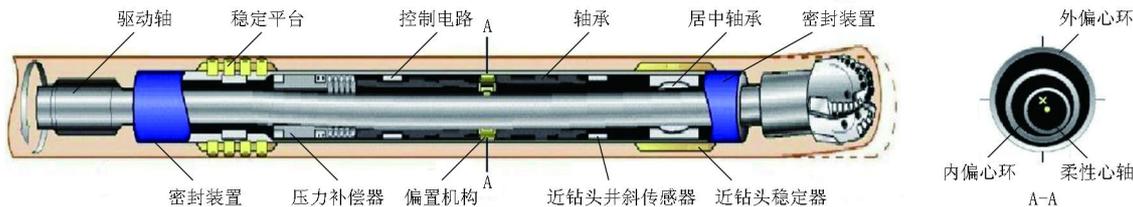


图5 Geo-Pilot 系统结构及导向原理

心轴的转动通过欧式连轴节传递到减速机构,经减速机构按 180:1 的比例减速后,通过离合器传递到偏心环,并带动偏心环转动。当 2 个偏心环分别转动一定角度以后,离合器脱开并起锁紧作用,阻止偏心环继续转动。这样,通过控制 2 个偏心环的转动角度,就可以控制心轴的偏置方向和位移,从而实现可控导向。

系统。

4.1 Halliburton Sperry-Sun 的 Geo-Pilot

1997 年,Sperry-Sun 公司与日本国家石油公司合作,在 RCDOS 基础上,在获得英国 Cambridge Drilling Automation Ltd 授权的柔性心轴结构的专利技术后,研发出了新一代偏置内推指向式旋转导向系统——Geo-Pilot。该系统主要由驱动心轴,不旋转外筒和偏心环偏置机构组成。其偏心环偏置机构由外偏心环,内偏心环及各自的偏置驱动机构组成,偏置驱动机构主要由欧式连轴节,减速机构及离合器等组成(如图 5 所示)。

4.2 Gyro-Data Drilling Automation Ltd 的 Well-Guide RSS

Gyro-Data Drilling Automation Ltd 收购了英国的 Cambridge Drilling Automation Ltd 的 AGS,并在其基础上形成了全闭环控制自动旋转导向系统——Well-Guide RSS(如图 6 所示)。

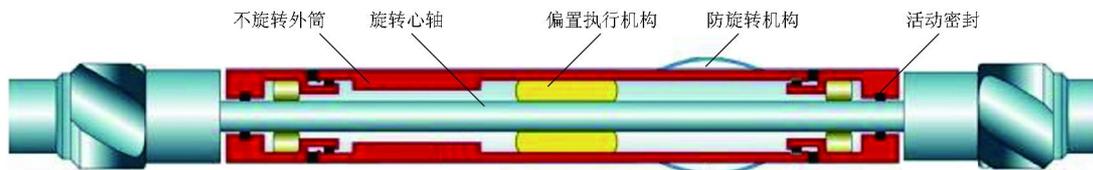


图6 Well-Guide RSS 系统结构

Well-Guide RSS 是一种偏置外推指向式旋转导向系统,它由旋转心轴和不旋转外筒组成。Well-Guide RSS 根据其近钻头的定向传感器测量信息,通过井下计算机计算出工具面,执行机构按照计算机指令自动将旋转心轴按预定工具面偏置(产生导向),偏置动力来源于心轴的转动。其井斜和方位的调整是井下自动闭环控制的,基本不需要地面干预,可钻出光滑的井眼,提高钻井效率和速度。

4.3 Halliburton Sperry-Sun 的 EZ-Pilot

EZ-Pilot 是一种偏置内推指向式旋转导向系统。它由心轴、带有偏心凸轮的内筒、含有测控系统的偏置外筒及轴承和密封机构组成(如图 7 所示)。

心轴与钻柱和钻头连接,起到传输钻井液和传

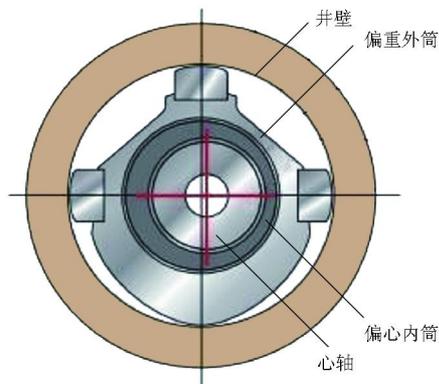


图7 EZ-Pilot 系统导向机构

递钻压、扭矩的作用。偏重外筒在一定井斜的井中,在偏重作用下自然稳定,并由其内部的测控机构确

定出井眼高边方向和内筒上的偏心凸轮的方向,以便控制其按预定要求偏置。偏重外筒内部有一航空性能的电控马达,由测控系统控制其转动,并带动带有偏心凸轮的内筒(偏心内筒)旋转到预定位置后加以锁定,使心轴产生偏置,实现导向。早期 Rotary Steerable Tools LLC 的 SmartSleeve 旋转导向系统与



图8 Revolution 系统结构及导向原理

Revolution 的偏置稳定器短节的动力机构是周向均布的一组(12个)轴向方向的柱塞泵,当驱动心轴旋转时,带动其上的一个一端带有斜面的圆盘一起转动。圆盘斜面在其每一周的转动过程中,依次推动各个柱塞泵,使它们依次产生一次轴向运动,将液压油注入液压腔,使液压腔的液压升高,该液压腔内储集的液压力在测控系统的控制下导入预定的偏置执行机构活塞列,该列活塞被支出,将不旋转外筒在该方向推出从而产生偏置作用。偏置后的不旋转外筒支撑于井壁,在井壁的反作用力作用下,将驱动心轴压弯,在近钻头稳定器的支点作用的协助下,使钻头倾斜,产生指向式导向作用。

4.5 Pathfinder Energy Services Inc 的 PathMaker

1999年 Pathfinder Energy Services Inc. 公司开始开发其指向式三维旋转导向系统 PathMaker。2002年收购了拥有三维旋转导向系统专利及开发经验的 3D Stabilizers 公司,对其开发此系统起到了巨大的推动作用。

PathMaker 是一种偏置外推指向式旋转导向系统,由旋转心轴和不旋转外筒 2 大部分组成。不旋转外筒上有 3 支可独立运作的支撑翼肋,用于提供偏置导向力(如图 9 所示)。

当驱动心轴旋转时,液压测控系统控制液压油

EZ-Pilot 的工作原理类似。

4.4 Weatherford International Ltd 的 Revolution

Revolution 是一种偏置外推指向式旋转导向系统,它由测控系统和偏置稳定器短节 2 大部分组成,其偏置稳定器短节由驱动心轴、不旋转外筒和偏置机构等组成(如图 8 所示)。

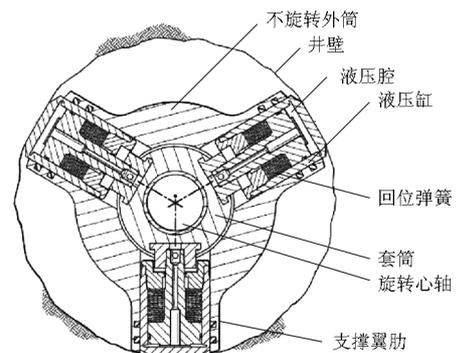


图9 PathMaker 导向机构

进入预定偏置执行机构活塞液压腔中,活塞被支出。产生的偏置合力将不旋转外筒在该合力方向推出,在井壁的反作用力作用下,推动心轴套筒,将驱动心轴压弯,从而带动钻头倾斜,产生导向作用。

4.6 Schlumberger 的 Power Drive Xceed

Power Drive Xceed 是 Schlumberger 的第二代产品。该系统与 Power Drive 系统一样是全旋转的,与井壁没有静止的触点,其导向机构的外筒随钻柱一起旋转,主要由万向节和驱动心轴 2 大主要部分组成,偏置方式类似 Geo-Pilot 的偏心环结构(如图 10 所示)。

万向节用于向钻头传递钻压、扭矩,并允许钻头倾斜。驱动心轴与钻头连接,用于向钻头传递钻并



图10 Power Drive Xceed 系统结构及导向原理

液,同时在偏置机构的作用下一一直处于一个固定的角度(0.6°)的倾向指向状态,并靠马达相对钻柱的反向旋转保持其指向方向的稳定,实现预定方向的导向。当不需要导向时,马达控制偏置机构和驱动心轴以一个不同于钻柱转速的速度旋转,使钻头的指向一直处于旋转变化的过程中,导向作用抵消,实现非导向钻进。

5 结语

国际上已成功商业化的旋转导向钻井系统大部分属于指向式,指向式导向系统已经成为未来旋转导向钻井技术的发展趋势。其优点在于该类系统的导向机构全部安置在钻柱内部,不与井壁直接接触,因此导向效果不受地层不完整或井眼扩径的影响,特别是在松软地层中其钻进效果要比推靠式好,能钻出更规则的井眼,可以更好地保障井下安全;而推靠式则会出现井眼螺旋化、扩径等问题。但是,由于指向式系统是通过偏置心轴来实现导向的,心轴及其相关偏置机构的可靠性、寿命等问题就直接决定了此类系统的工作性能。目前,大口径的指向式导向技术已趋于成熟,但如何在保证良好导向性能的

前提下,实现小口径导向钻进将是未来发展的一个方向。

参考文献:

- [1] DOWNTON G, HENDRICKS A, KLAUSEN T S, et al. New directions in rotary steering drilling[J]. Oil Field Review, 2000, 12(1): 18-29.
- [2] WEIJERMANS P, RUSZKA J, JAMSHIDIAN H, et al. Drilling with rotary steerable system reduces wellbore tortuosity[J]. SPE/IADC67715, 2001: 1-10.
- [3] 苏义脑, 窦修荣, 王家进. 旋转导向钻井系统的功能、特性和典型结构[J]. 石油钻采工艺, 2003, 25(4): 5-7.
- [4] 李作会, 孙铭新, 韩来聚. 旋转自动导向钻井技术[J]. 石油矿场机械, 2003, 32(4): 8-10.
- [5] 肖仕红, 梁政. 旋转导向钻井技术发展现状及展望[J]. 石油机械, 2006, 34(4): 66-70.
- [6] 赵金洲, 孙铭新. 旋转导向钻井系统的工作方式分析[J]. 石油机械, 2004, 32(6): 73-75.
- [7] 李俊, 倪学莉, 张晓东. 动态指向式旋转导向钻井工具设计探讨[J]. 石油矿场机械, 2009, 38(2): 63-66.
- [8] 孙铭新. 旋转导向钻井技术[M]. 山东东营: 中国石油大学出版社, 2009.
- [9] 李汉兴, 姜伟, 蒋世全, 等. 可控偏心器旋转导向钻井工具研制与现场试验[J]. 石油机械, 2007, 35(9): 71-74.
- [10] 闫文辉, 彭勇. 旋转导向钻井工具导向执行机构设计[J]. 天然气工业, 2006, 26(11): 70-72.

重庆加速页岩气勘探开发

《中国矿业报》消息(2012-09-18) 重庆地质矿产研究院日前与斯伦贝谢油田(新加坡)公司合资组建的页岩气技术服务公司在渝签订合作合同。合资公司将立足重庆、面向全国,为页岩气的勘探开发提供技术服务。重庆市市长黄奇帆出席签约仪式并发表讲话。

据了解,斯伦贝谢公司是世界最大的油田技术服务商,是推动和支撑全球页岩气快速发展的技术核心力量。重庆地质矿产研究院是全国最早介入页岩气勘探开发的地方科研单位,在重庆市国土资源和房屋管理局的支持下,组建了一支页岩气专业技术队伍,实施了9口参数钻井,其中黔页1井点火成功并获取工业气流,取得了渝东南地区页岩气勘探重大突破。双方的合资合作,将建立高水平技术、人才和管理的引进通道和平台,对于促进我国和重庆的页岩气开发,具有长远战略意义。

黄奇帆说,纵观历史,人类具有里程碑意义的发展都与能源、信息革命密切相关,而页岩气的开发利用是近年来人类的一项伟大技术革命,将改变世界能源格局。据探测,我

国是页岩气储量最丰富的国家之一,如果开发利用好页岩气,我国能源需求将在很大程度上实现自给,这对整个国民经济发展具有重大战略意义。重庆是国内页岩气资源较为富集的地区,重庆市委、市政府已决定将页岩气的开发利用列为今后5~10年的一项战略措施,力争把重庆建成全国页岩气开发的主战场。

黄奇帆说,为实现这一目标,重庆明确了三管齐下的页岩气全面发展战略:一是加快推进页岩气的勘探开采工作,力争到2015年形成15~20亿 m^3 的年开采量,到2020年形成约100亿 m^3 的年开采量;二是着眼今后页岩气开采量的增加,谋划布局天然气化工产业;三是针对页岩气开发需要而提供采掘设备和技术服务。此次专门成立页岩气技术服务公司,不仅服务重庆的页岩气开发,也为全国页岩气开发提供技术服务。重庆地质矿产研究院与斯伦贝谢公司的合作,将致力于研发适合我国地质特性的勘探开发技术,推动重庆乃至全国页岩气的勘探开发,同时它也标志着重庆页岩气全面发展战略迈出重要一步。