

文章编号: 0253-2697(2009)02-0300-04

# 气体钻井地面分离器的设计及试验研究

付双成<sup>1</sup> 孙国刚<sup>1</sup> 姬忠礼<sup>2</sup>

(1. 中国石油大学化学科学与工程学院 北京 102249; 2. 中国石油大学机电工程学院 北京 102249)

**摘要:** 气体钻井现有工艺都将环空返回到地面的携岩气体直接排放或放燃,既污染环境又浪费能源。根据气体钻井的特点,设计了由两级串联的旋风分离器与两台过滤器(一台备用)组成的气体钻井地面分离系统,对成本较高的气体钻井介质(氮气或天然气)进行回收和循环利用。通过对井口钻屑的采样分析和浓度计算,得到了旋风分离器入口钻屑的粒度分布和质量浓度范围。对旋风分离器进行的室内模拟试验结果表明,旋风分离器的分离效率稳定在99.5%以上,能够完全除净粒径大于10 $\mu\text{m}$ 的粉尘颗粒。钻井现场试验结果显示,整个分离系统工作稳定,过滤器出口气体中钻屑的最大粒径小于5 $\mu\text{m}$ ,质量浓度小于0.05 mg/m<sup>3</sup>,已达到进入压缩机的要求。

**关键词:** 气体钻井; 气体回收; 旋风分离器; 分离系统; 分离效率

**中图分类号:** TE242.7

**文献标识码:** A

## Design and experiment study of ground separation equipment in gas drilling

FU Shuangcheng<sup>1</sup> SUN Guogang<sup>1</sup> JI Zhongli<sup>2</sup>

(1. Faculty of Chemical Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

2. Faculty of Mechanical and Electronic Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

**Abstract:** At present, the gas for carrying cuttings in gas drilling system is commonly burnt or exhausted directly, which causes pollution of environment and waste of energy. A ground system was designed to separate drilling cuttings from gas in gas drilling. The system is composed of two-stage series-wound cyclone separators and two filters (one is spare). The high-cost drilling gas purified by this system can be recovered and recycled. The granularity and mass concentration of cuttings at inlet of cyclone separator were obtained on the basis of the concentration of the drilling cuttings at wellhead. The simulation test in laboratory indicated that the separation efficiency of cyclone separator could be above 99.5%, and drilling cuttings bigger than 10 $\mu\text{m}$  in diameter could be removed absolutely. The field tests indicated that the system operated steadily and reliably. The diameters of drilling cuttings at the filter outlet were smaller than 5 $\mu\text{m}$ , and the mass concentration was less than 0.05 mg/m<sup>3</sup>, which could meet the requirement of compressors.

**Key words:** gas drilling; gas recovery; cyclone separator; separation system; separation rate

气体钻井技术不但可以减轻地层伤害、提高油井产能,还可以提高钻井速度,缩短钻井周期<sup>[1-3]</sup>。国内外现行的气体钻井工艺利用排砂管线将环空返回到地面的携岩气体直接排放到放喷池中;当有油、气产出时,在排砂管线出口进行点火放燃,既污染环境、浪费能源,同时还增加了钻井成本。针对这种状况,柳贡慧等人<sup>[4]</sup>提出了气体循环钻井的工艺方案,将环空返回地面成本较高的携岩气体(如氮气、天然气)进行分离净化,经压缩机、增压机加压后重新注入井筒,实现气体钻井时的循环利用。其中井口携岩气体的分离净化是最关键的一个环节。

目前国外已见一些有关充气钻井液中气体回收工艺的专利<sup>[5-7]</sup>,但对气体钻井中携岩气体回收工艺与设备的研究报道却很少。笔者设计了一套气体钻井地面分离系统,并进行了旋风分离器的实验室模拟试验和分离系统的氮气钻井现场分离效果试验。

## 1 气体钻井地面分离系统的设计

气体钻井井口携岩气流中的钻屑质量流量很大,钻屑粒径也随着钻井速度、注气量、井深、地质情况的差异变化很大,携岩气流中还可能含油、水。鉴于气体钻井井口返流状况的复杂性与不确定性,井口分离应

**基金项目:** 国家高技术研究发展计划(863)项目(2006AA06A103)、中国石化股份公司科技开发项目(P05062)和中石油重点技术开发项目(06B2030503)联合资助。

**作者简介:** 付双成,男,1976年6月生,1999年毕业于辽宁石油化工大学,现为中国石油大学(北京)在读博士研究生,主要从事多相流分离技术与装备的研究。E-mail: fushch711@163.com

采用多级分离工艺：旋风分离除去气流中携带的粒径较大的钻屑颗粒及液滴,保护后续的过滤器,并延长过滤器工作寿命；过滤器进行气体的精细净化,以保证气体净化质量。气体钻井井口地面分离系统由两级串联的旋风分离器与两台过滤器(一台备用)组成,其流程如图 1 所示。第一级、第二级旋风分离器分离出来的钻屑、液滴等落入其下面的料罐中,用液体输送方式将其排出料罐。料罐中的液体同时起到液封的作用。

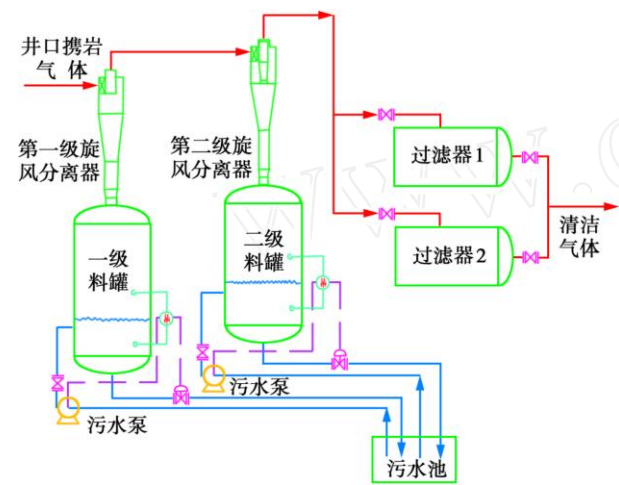


图 1 井口地面分离系统流程示意图

Fig.1 Flowchart of wellhead ground separation system

该分离系统主要用于钻采储层的氮气或者天然气的净化回收,井口分离器的设计条件可按储层钻进参数确定。如用氮气作三开钻进,井深为 3 000 m,钻头

直径为 215.9 mm,套管直径为 244.5 mm,机械钻速为 10 ~ 30 m/h,注气量为 100 m<sup>3</sup>/min (标准状态),井口压力为 0.2 ~ 0.3 MPa,工作温度为 50 。由此便可设计出旋风分离器及过滤器的结构尺寸。

2 旋风分离器的模拟试验

2.1 井口工况的调研与计算

地面分离系统的设计关键是井口携岩气体工况条件。井口携岩气体的气量、气体中钻屑的粒度和质量浓度都是旋风分离器的设计和试验所关心的参数。气体钻井井口携岩气量可以根据气体钻井注气量和井口压力计算出来。现行的气体钻井井口携岩气体都进行直接放燃,笔者对井口携岩气体中的钻屑进行了采样粒度分析和质量浓度计算。

2.1.1 井口钻屑粒度

钻屑粒度不但是影响注气量的一个重要因素,也是影响旋风分离器分离效率的重要因素。在气体钻井过程中,气体的携岩能力有限,如果钻屑粒径太大,则不能被上升气流带至环空或者带出井口。井底和环空中较大粒径的钻屑被反复破碎成为小粒径的钻屑,直到能被上升气流带出井口。现在对于钻屑粒度取值的看法没有一致意见<sup>[8-9]</sup>,钻屑粒度大小与注气量、井深、钻进速度、钻头类型、岩层性质等因素都有关系,是一个比较难确定的数值。笔者在四川对几口气体钻井井口的钻屑进行了采样分析,如表 1 所示。

表 1 气体钻井工况及井口钻屑粒度分布

Table 1 Condition of gas drilling and the granularity of wellhead drilling cuttings

井位	注气量(标准状态)/ (m <sup>3</sup> ·min <sup>-1</sup> )	井深/m	钻井气体	机械钻速/ (m·h <sup>-1</sup> )	粒径中值/μm	80 % 钻屑的粒径分布范围/μm
大邑 4 井	90	5 077	氮气	6	20.62	16.04 ~ 59.87
大邑 101 井	90	4 600	氮气	6	32.76	17.48 ~ 74.61
龙岗某井	120	2 200	空气	7	58.54	35.86 ~ 266.54

从表 1 中可以看出：

- (1) 井口钻屑的粒度随着注气量的增加而增大。注气量越大,气体携岩能力越强,能被带到井口钻屑的粒度就会越大。注气量决定了气体的携岩能力,是影响井口钻屑粒度的最主要因素。
- (2) 井口钻屑的粒度随着井深的增加而减小。井深增加,钻屑在环空停留时间增加,破碎的机会增加,钻屑粒径变小;对于相同粒径的钻屑,井深越深,将其携带的井口所需要的能量越大,即在相同的携岩气量时,井深越深,所能携带到井口的钻屑粒度越小。
- (3) 井口钻屑的粒度随着机械钻速的增加而减

- 小。在相同岩性和钻头的条件下,机械钻速减小,钻进过程中产生的钻屑粒度就越小,井口钻屑粒度也会相应地变小。
  - (4) 在正常气体钻井条件下,2 000 ~ 5 000 m 之间井深的钻屑粒径主要分布在 15 ~ 300 μm 之间,钻屑的粒径中值主要分布在 20 ~ 60 μm 之间,这为气体钻井分离系统的设计和试验提供了基础依据。
- 2.1.2 井口钻屑浓度
- 井口钻屑浓度随着钻进过程的变化而变化。在开始钻进时,钻屑逐渐充满环空,井口浓度增加,然后井口钻屑浓度逐渐趋于一个稳定值。在接单根之前,需

要把井筒环空内的钻屑清理干净,这时井口钻屑浓度逐渐降低。由于气体的携岩能力有限,井口钻屑浓度一般不会太高,空气钻井工艺通常规定,钻进时环空钻屑体积浓度的最高允许值为 3%<sup>[10]</sup>。由于环空中越接近井口压力越低,气体体积变大,钻屑的浓度变低,所以井口钻屑浓度会低于这个最高允许浓度值。

在正常稳定钻进过程中,井口的钻屑浓度波动较小,按此时的工况进行井口钻屑质量浓度计算。假设在稳定钻进过程中产生的钻屑被全部及时携带出来,根据注气量计算出井口钻屑的质量浓度为

$$G = \frac{V}{60Q} \quad (1)$$

式中:  $G$  为标准状态井口钻屑质量浓度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $V$  为钻进时产生并被带出钻屑的体积流量<sup>[11]</sup>,  $\text{m}^3/\text{h}$ ;  $Q$  为标准状态注气量,  $\text{m}^3/\text{min}$ 。

由表(1)、式(1)可以计算出标准状态井口钻屑的质量浓度为 140 ~ 420  $\text{g}/\text{m}^3$ 。井口压力为 0.2 MPa 时,进入旋风分离器的实际钻屑质量浓度为 280 ~ 840  $\text{g}/\text{m}^3$ 。

## 2.2 模拟试验

在大型冷模实验室,按照旋风分离器入口气速相

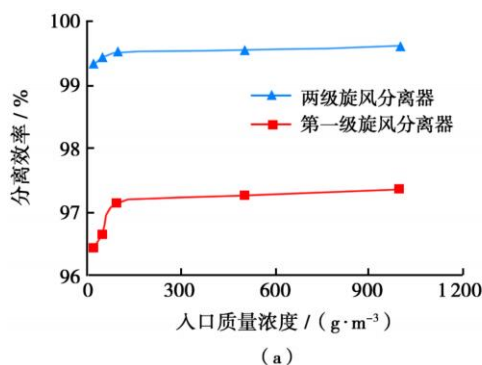


图 2 旋风分离器分离效率与入口操作参数的关系

Fig. 2 Cyclone separator efficiency at different inlet operating parameters

100  $\text{g}/\text{m}^3$  以后,两级旋风分离器的总分离效率增幅不大。第一级旋风分离器能够分离出 96% ~ 97.5% 的钻屑,两级旋风分离器的总分离效率一直能够稳定维持在 99.5% 以上,这说明在设计范围内的不同钻屑质量浓度条件下,旋风分离器能够保证高效稳定工作。

### 2.3.2 井口气量对旋风分离器性能的影响

对于旋风分离器来说,井口气量的变化主要表现为旋风分离器入口气速的变化。试验入口质量浓度为 100  $\text{g}/\text{m}^3$ ,分离效率测试结果如图 2(b) 所示。

从图 2(b) 中可以看出,当入口质量浓度一定时,第一级旋风分离器的分离效率和两级旋风分离器的总分离效率都随着入口气速的增加而逐渐提高。在旋风

同的原则对该分离系统中的两级串联旋风分离器进行了负压分离性能试验。利用毕托管测量旋风分离器入口气量,利用 U 形差压计测量旋风分离器的压降。根据采样钻屑的粒度分析结果,试验选用 325 目滑石粉、FCC 废催化剂、30 ~ 60 目砂子按质量比为 6 : 3 : 1 掺混的混合粉料来模拟气体钻井井口钻屑。分离效率为

$$= \frac{G_c}{G} \times 100\% \quad (2)$$

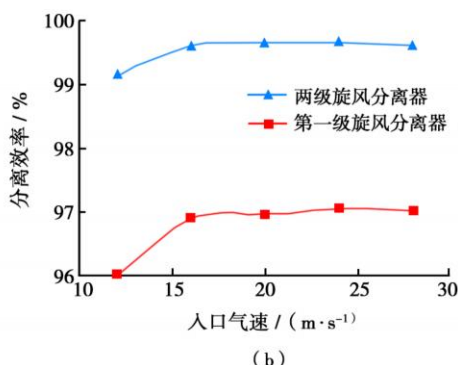
式中:  $G$  为旋风分离器入口加料质量,  $\text{kg}$ ;  $G_c$  为旋风分离器底部收料质量,  $\text{kg}$ 。

## 2.3 试验结果与分析

### 2.3.1 井口钻屑质量浓度对旋风分离器性能的影响

由设计条件中的注气量、井口压力及第一级旋风分离器入口面积可以计算出第一级旋风分离器入口设计气速为 17 ~ 28  $\text{m}/\text{s}$ 。试验入口气速采用 20  $\text{m}/\text{s}$ ,根据计算的井口钻屑质量浓度确定试验加料的质量浓度为 20  $\text{g}/\text{m}^3$ 、50  $\text{g}/\text{m}^3$ 、100  $\text{g}/\text{m}^3$ 、500  $\text{g}/\text{m}^3$  和 1 000  $\text{g}/\text{m}^3$ ,分离效率测试结果如图 2 所示。

从图 2(a) 中可以看出,第一级旋风分离器的分离效率和两级旋风分离器的总分离效率都随着入口处质量浓度的增加而增加,当入口处质量浓度达到



分离器设计气速为 17 ~ 28  $\text{m}/\text{s}$ ,第一级旋风分离器的分离效率维持在约 97%,两级旋风分离器串联的总分离效率稳定维持在 99.5% 以上。说明此旋风分离器能够在设计范围内的不同入口气量条件下保证高效平稳工作。

### 2.3.3 第二级旋风分离器出口气体粒度分析

在入口气速为 16  $\text{m}/\text{s}$ 、入口质量浓度为 100  $\text{g}/\text{m}^3$  的试验条件下,对第二级旋风分离器出口气体中的粉尘进行了采样和粒度分析,粒度分析结果如图 3 所示。从图 3 可以看出,两级旋风分离器能够完全除净气体中大于 10  $\mu\text{m}$  的粉尘颗粒,这为后续的过滤器工作减轻了负荷,能够有效地延长过滤器滤芯的使用寿命。

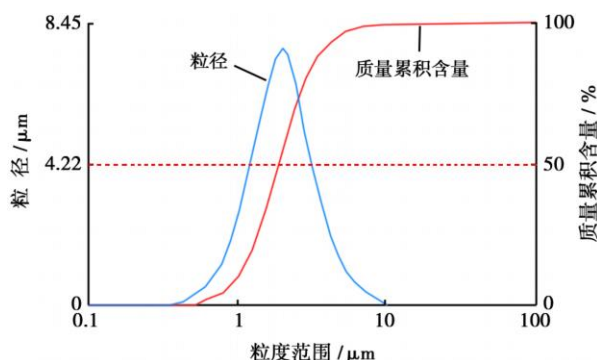


图 3 第二级旋风分离器出口气体中钻屑粒径分布

Fig. 3 Particle sizes in the outlet gas of the secondary cyclone separator

### 2.3.4 旋风分离器在纯气流下的压降

旋风分离器压降在纯气流条件下测试结果如图 4 所示。第一级旋风分离器压降和两级旋风分离器的总压降都随着入口气速的增加而增大,即随着井口气体流量的增加而增大。在设计气速范围内,两级旋风分离器总压降只有约 0.02 MPa,而实际运行中含空气流的压降会更小一些,这样小的压降将不会影响到正常的气体钻井操作。

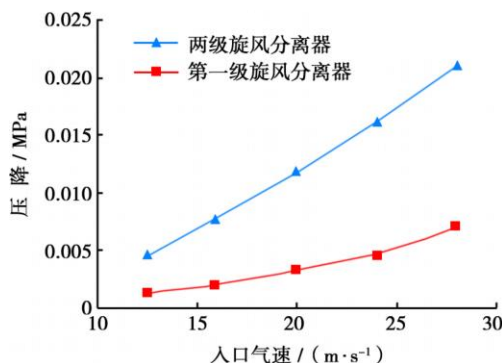


图 4 旋风分离器压降与入口气速的关系

Fig. 4 Cyclone separator pressure drop at different inlet gas velocity

## 3 现场试验

本套分离系统在 2007 年某油井 A 进行了氮气钻井现场分离效果测试。井口出来的携岩气体从排砂管线引入到旋风分离器和过滤器,过滤后的气体仍然直接排放。井 A 测试时的钻进工况为:氮气作四开钻进,井深为 4 600 m,钻头直径为 165.1 mm,机械钻速为 6 m/h,注气量为 90 m<sup>3</sup>/min (标准状态),井口压力为 0.16 MPa。由此可以计算出井口携岩气体中钻屑的实际平均质量浓度为 102.7 g/m<sup>3</sup>。

在第二级旋风分离器出口,利用 CCD1000-FB 型便携式微电脑粉尘仪(精度为 0.01 mg/m<sup>3</sup>)测试分离

后气体的质量浓度小于 200 mg/m<sup>3</sup>,两级旋风分离器总分离效率在 99.8% 以上。在过滤器出口,利用 AM510 型智能防爆粉尘测试仪(精度为 0.001 mg/m<sup>3</sup>)在线测试过滤后气体中粉尘质量浓度为 0.02 ~ 0.05 mg/m<sup>3</sup>,且出口气体中粉尘最大粒径小于 5 μm,完全能够满足进入压缩机和增压机的要求。从综合录井仪监测到的立管压力可以看到,把井口携岩气体引入到旋风分离器和过滤器以后,立管压力增加 0.1 MPa,可见地面分离系统对钻进过程的影响很小。

## 4 结 论

(1) 针对气体钻井的工况,为了回收井口的携岩气体,设计了两级旋风分离器与过滤器组合的气体钻井地面分离系统。气体钻井井口钻屑粒度的采样分析、钻屑粒径的分布状况以及对井口携岩气体的钻屑质量浓度的计算,为井口分离器的设计提供了基础依据。

(2) 试验结果表明,入口质量浓度和入口气量在设计范围内波动时,两级旋风分离器的总分离效率都能稳定地维持在 99.5% 以上,说明此旋风分离器抵抗钻屑浓度和井口气量波动的能力比较强,能够保证系统操作的稳定性和高效性。从粒度分析结果来看,两级旋风分离器能够完全除净气体中大于 10 μm 的钻屑颗粒。

(3) 两级旋风分离器的总分离效率维持在 99.5% 以上,分离性能高效稳定。过滤器出口质量浓度为 0.02 ~ 0.05 mg/m<sup>3</sup>,且出口气体中粉尘最大粒径小于 5 μm,完全能够满足进入压缩机和增压机进行回收利用的要求。

## 参 考 文 献

- [1] 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.  
Guo Jianhua, She Chaoyi, Li Qian, et al. Quantitative analysis and controlling method for pipe string erosion in gas drilling[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(6):129-132.
- [2] 赵忠举. 欠平衡钻井技术[M]. 北京:中国石油天然气集团公司信息研究所,1998:8-9.  
Zhao Zhongju. Underbalanced drilling technology[M]. Beijing: Institution of Information Research of China National Petroleum Corporation, 1998:8-9.
- [3] 周英操,翟洪军. 欠平衡钻井技术与应用[M]. 北京:石油工业出版社,2003:2-4.  
Zhou Yingcao, Zhai Hongjun. Underbalanced drilling technology and application[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003:2-4.
- [4] 付双成,孙国刚,柳贡慧,等. 天然气钻井气体回收设备的研制[J]. 石油钻探技术,2008,36(5):28-31.

(下转第 307 页)



### 3 结 论

(1) 设计了一种用于 88.9 mm 井眼的水力加压器,通过对水力加压器与井下马达的钻压分析可以看出,在钻井过程中不能把水力加压器认为是一个独立的工具。

(2) 水力加压器和安装在其下的所有元件组成一个相互作用的系统,即带水力加压器底部钻具组合的稳定操作钻压取决于钻具组合的形式和各种钻井参数,它们共同作用使得钻压达到一个稳定的值。

(3) 要获得应用水力加压器的最佳效益除了需要相应的理论指导外,还需要一定的经验。

### 参 考 文 献

- [1] 丁培积,陈天成,刘嘉铭,等.水平井水力加压工具及其应用[J].石油钻探技术,1995,23(3):41-43.  
Ding Peiji, Chen Tiancheng, Liu Jiaming, et al. Hydraulic pressurizing tools for horizontal well and its application [J]. Petroleum Drilling Techniques, 1995, 23(3): 41-43.
- [2] 吴姬昊,金潮苏.水力加压工具中限位指示装置的研究[J].石油钻探技术,2002,30(4):48-49.  
Wu Jihao, Jin Chaosu. Study of limit indicating unit in hydraulic pressure tools [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2002, 30(4): 48-49.
- [3] 林元华,黄万志,施太和,等.水力加压器研制及应用[J].石油钻采工艺,2003,25(3):1-3.  
Lin Yuanhua, Huang Wanzhi, Shi Taihe, et al. Development and application of the thruster [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2003, 25(3): 1-3.
- [4] 马自江,孙志和,刘月军.水力加压装置研究与应用[J].石油钻采工艺,2001,23(5):36-37.

- Ma Zijiang, Sun Zhihe, Liu Yuejun. Study and application of the hydraulic wob-promoting assembly [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2001, 23(5): 36-37.
- [5] 黄万志,林元华,施太和,等.水力加压装置的设计与现场试验分析[J].天然气工业,1998,18(6):54-56.  
Huang Wanzhi, Lin Yuanhua, Shi Taihe, et al. Design and field experiment of a new thruster [J]. Nature Gas Industry, 1998, 18(6): 54-56.
- [6] 林元华,黄万志,施太和.水力加压器和井下马达组合时的钻压计算[J].石油钻采工艺,1999,21(1):1-5.  
Lin Yuanhua, Huang Wanzhi, Shi Taihe. WOB calculation for combination of hydraulic thruster and downhole motor [J]. Oil Drilling & Production Technology, 1999, 21(1): 1-5.
- [7] Matthias R, Hoving P G, Makohl F. Drilling performance improvements using downhole thrusters [R]. SPE 29420, 1995.
- [8] 苏义脑,王家进.中空螺杆钻具的外特性及其改进[J].石油学报,1998,19(1):89-95.  
Su Yinao, Wang Jiajin. The performance of positive displacement motor with hollow rotor and its improvement [J]. Acta Petrolei Sinica, 1998, 19(1): 89-95.
- [9] 万邦烈,李继志.石油矿场水力机械[M].北京:石油工业出版社,1990:280-330.  
Wan Banglie, Li Jizhi. Oil field hydraulic equipment [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1990: 280-330.
- [10] 苏义脑.螺杆钻具的工作特性[J].石油钻采工艺,1998,20(6):11-15.  
Su Yinao. Performance of screw drill tools [J]. Oil Drilling & Production Technology, 1998, 20(6): 11-15.
- [11] Johancsik C A, Friesen D B, Dawson R. Torque and drag in directional wells—prediction and measurement [R]. SPE 11380, 1984.

(收稿日期 2008-02-01 改回日期 2008-05-13 编辑 仇学艳)

### (上接第 303 页)

- Fu Shuangcheng, Sun Guogang, Liu Gonghui, et al. Research of gas recovery equipments in natural gas drilling [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2008, 36(5): 28-31.
- [5] Chitty G H, Saponja J C, Hosie D G. Closed loop multiphase underbalanced drilling process: United States, 7 178 592 B2 [P]. 2007-02-20.
- [6] Speed D. Recovery of gas from drilling fluid returns in underbalanced drilling: United States, 5 775 442 [P]. 1998-07-07.
- [7] Sprehe P R. Well drilling system with closed circulation of gas drilling fluid and fire suppression apparatus: United States, 5 890 549 [P]. 1999-04-06.
- [8] 李爱军.浅析空气(雾化)钻井并眼净化[J].石油钻井工程,1994,1(4):24-28.  
Li Aijun. Analysis on hole cleaning of air (atomized) drilling [J]. Petroleum Drilling Engineering, 1994, 1(4): 24-28.
- [9] 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.
- Meng Yingfeng, Lian Zhanghua, Liang Hong, et al. CFD numerical simulation research on cuttings-carried capability in gas horizontal drilling [J]. Natural Gas Industry, 2005, 25(7): 50-52.
- [10] 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.  
Zhu Jiang, Wang Ping, Cai Lishan, et al. Air drilling technology and its application [J]. Drilling & Production Technology, 2007, 30(2): 145-148.
- [11] 鄢捷年.钻井液工艺学[M].东营:石油大学出版社,2001:271-290.  
Yan Jienian. Drilling fluid technology [M]. Dongying: China University of Petroleum Press, 2001: 271-290.

(收稿日期 2008-04-24 改回日期 2008-07-14 编辑 仇学艳)