

◀ 钻井完井 ▶

doi:10.3969/j.issn.1001-0890.2012.01.007

深水钻井隔水管增压排量对井筒温度分布的影响

夏环宇¹, 翟应虎¹, 安 岩², 崔永兴¹

(1. 石油工程教育部重点实验室(中国石油大学(北京)), 北京 102249; 2. 中国石油辽河油田分公司钻采工艺研究院, 辽宁盘锦 124010)

摘 要: 由于受深水低温特性的影响, 深水钻井中, 井筒流体温度分布的计算与陆地钻井中井筒流体温度分布有所不同。隔水管增压管线排量的存在使流体温度进一步降低, 因此深入了解增压管线内排量对深水钻井井筒流体温度分布的影响规律十分重要。基于无隔水管增压排量下深水温度分布的计算方法, 考虑突扩孔道流动的问题, 结合热力学相关理论, 对加隔水管增压管线排量时的深水钻井井筒流体温度分布进行了研究, 建立了该情况下温度分布的预测方法, 得到了井筒流体温度分布。研究表明: 隔水管增压管线排量对深水井筒流体的温度分布影响明显, 且影响区域较大; 较管柱而言, 增压排量对环空内井筒流体温度场分布的影响更为明显; 因钻井液和流动方向的不同, 较环空而言, 管柱内钻井液温度受增压排量的影响更深。因此, 研究深水钻井中的深水温度分布时, 隔水管增压排量的影响必须加以考虑。

关键词: 深水钻井 隔水管 钻井液 排量 温度分布

中图分类号: TE21 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-0890(2012)01-0032-05

The Effect of Boost Flow in Riser on the Wellbore Temperature in Deep Water Drilling

Xia Huanyu¹, Zhai Yinghu¹, An Yan², Cui Yongxing¹

(1. MOE Key Laboratory of Petroleum Engineering (China University of Petroleum (Beijing)), Beijing, 102249, China; 2. Drilling & Production Technology Research Institute of Liaohe Oilfield Company, PetroChina, Panjin, Liaoning, 124010, China)

Abstract: Low temperature in deep water drilling makes the wellbore temperature distribution different from that in onshore wells, and the fluid in boost line makes the wellbore temperature lower. So it is necessary to understand the effect of the flow rate in boost line on borehole temperature distribution. Based on the calculation method of deep water temperature field without boost flow in riser, the wellbore fluid temperature field in deep water drilling with boost flow in riser was studied while considering the issue of expansion channel flow and combining related theories of thermodynamics, and the method to predict temperature field was established. The results showed that boost line had significant influence on the distribution of wellbore fluid temperature in deep water drilling with large influencing range, the boost line had more obvious influence comparing with pipe string, the influence of boosted flow on drilling fluid temperature was even deep into the formation resulting from different level of drilling fluid in annular and string. Therefore, the influence of boosted flow must be considered in deep-water temperature distribution in deep water drilling.

Key words: deep water drilling; riser pipe; drilling fluid; flow rate; temperature distribution

1 概 述

深水低温对隔水管和套管受力影响显著, 因此, 准确预测深水钻井中深水井筒流体温度分布对钻前套管设计很有帮助; 且深水井地层浅层破裂压力低, 钻井液当量循环密度窗口窄, 所以深水钻井液的设计对井筒流体温度场预测的准确性提出了更高

收稿日期: 2011-08-19; 改回日期: 2011-12-08。

作者简介: 夏环宇(1984—), 男, 2007年毕业于中国石油大学(北京)石油工程专业, 油气井工程专业在读博士研究生, 主要从事钻井水力学设计、岩石力学等方向的研究工作。

联系方式: (010)89733706, xia8410@163.com。

通讯作者: 翟应虎, fgs@cup.edu.cn。

基金项目: 国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发”子课题“深水钻井工程设计关键技术研究”(编号: 2008ZX05026-001-01)的部分内容。

要求。

深水钻井中常采用长距离大直径隔水管钻井循环系统,如图1所示。图中, Q_1 代表常规钻井中的钻井液排量; Q_2 代表在隔水管井下增压线中的钻井液排量,该部分钻井液不经过地层段,直接从隔水管底部返回到钻井船。必要时,通过 Q_2 的补偿,提高隔水管内钻井液的上返速度,以满足携岩要求。

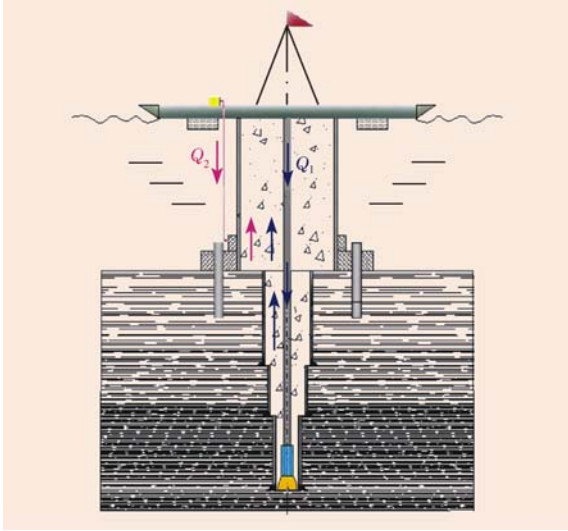


图1 深水钻井钻井液循环携岩示意

Fig.1 Drilling fluid circulating system and cuttings carrying in deepwater drilling

与陆地钻井不同,深水钻井中深水低温对井筒流体温度分布影响明显,但在深水温度的预测中,隔水管底部存在的突扩孔道问题均被忽略。然而,当增加隔水管增压管线排量时,隔水管内流量变大,突扩孔道流动现象明显,其影响应予以考虑。另外,隔水管内增压排量的存在可能会改变隔水管内流体的流态,使流体与各壁面的传热系数发生变化^[1-3]。

目前,深水井筒流体温度分布的预测方法已经成熟^[4],预测结果也相当准确。然而,钻井循环时,在有隔水管增压管线排量的情况下,伴随钻井液排量 Q_1 和 Q_2 的不同,深水钻井井筒流体流场的分布将发生改变,深水温度分布变得更加复杂。笔者在前人研究的基础上,考虑了突扩孔道的问题,利用热

力学相关理论,对加隔水管增压管线排量时的深水钻井井筒流体温度分布进行了探索性研究。

2 温度分布模型

采用 J. Rornero^[2] 等人的研究成果,建立初始深水钻井井筒流体温度分布模型。J. Rornero 模型在深水钻井温度场分布预测中的应用较为普遍^[3,5],预测结果准确性较高。计算井筒流体温度分布时也应考虑各种因素^[6-7],以使深水井筒流体温度结果更符合实际。

2.1 初始井筒流体温度模型

管柱内:

$$\frac{dT_c}{dt} + v \frac{\partial T_c}{\partial z} = \frac{2h_{ci}(T_a - T_c)}{\rho_a C_1 r_{ci}} \quad (1)$$

环空地层段:

$$\frac{\partial T_a}{\partial t} + v \frac{\partial T_a}{\partial z} = \frac{2r_{co}h_{ca}(T_c - T_a)}{\rho_a C_1 (r_{ai}^2 - r_{co}^2)} + \frac{2r_{ai}h_{fa}(T_f - T_a)}{\rho_a C_1 (r_{ai}^2 - r_{co}^2)} \quad (2)$$

环空海水段:

$$\frac{\partial T_a}{\partial t} + v \frac{\partial T_a}{\partial z} = \frac{2r_{co}h_{ca}(T_c - T_a)}{\rho_a C_1 (r_{ai}^2 - r_{co}^2)} + \frac{2r_{ai}h_{sa}(T_s - T_a)}{\rho_a C_1 (r_{ai}^2 - r_{co}^2)} \quad (3)$$

式中: v 为钻井液的平均流速,m/s; ρ_a 为钻井液密度,kg/L; T_c 为某深处管柱内钻井液的温度,℃; T_a 为某深处环空钻井液的温度,℃; T_f 为某深处的地层温度,℃; T_s 为某深处的海水温度,℃; r_{ci} 为管柱的内半径,m; r_{co} 为管柱的外半径,m; r_{ai} 为套管的内半径,m; C_1 为钻井液比热,J/(kg·℃); h_{ci} 为管柱内壁与钻井液的换热系数,W/(m·℃); h_{ca} 为管柱外壁与钻井液的换热系数,W/(m·℃); h_{fa} 为地层与钻井液的换热系数,W/(m·℃); h_{sa} 为地层与钻井液的换热系数,W/(m·℃)。

对式(1)~(3)进行隐式差分求解,得到的差分形式为:

$$\begin{cases} \frac{(T_c)_i^{n+1} - (T_c)_i^n}{\Delta t} + v_c \frac{(T_c)_{i+1}^n - (T_c)_i^n}{\Delta z} = \frac{2h_{ci}[(T_a)_i^n - (T_c)_i^n]}{\rho_a C_1 r_{ci}} \\ \frac{(T_a)_i^{n+1} - (T_a)_i^n}{\Delta t} + v_a \frac{(T_a)_{i+1}^n - (T_a)_i^n}{\Delta z} = \frac{2r_{co}h_{ca}[(T_c)_i^n - (T_a)_i^n]}{\rho_a C_1 (r_{ai}^2 - r_{co}^2)} + \frac{2r_{ai}h_{fa}[(T_f)_i^n - (T_a)_i^n]}{\rho_a C_1 (r_{ai}^2 - r_{co}^2)} \\ \frac{(T_a)_i^{n+1} - (T_a)_i^n}{\Delta t} + v_a \frac{(T_a)_{i+1}^n - (T_a)_i^n}{\Delta z} = \frac{2r_{co}h_{ca}[(T_c)_i^n - (T_a)_i^n]}{\rho_a C_1 (r_{ai}^2 - r_{co}^2)} + \frac{2r_{ai}h_{sa}[(T_s)_i^n - (T_a)_i^n]}{\rho_a C_1 (r_{ai}^2 - r_{co}^2)} \end{cases} \quad (4)$$

按钻井液所处位置分管柱内、地层环空段和海水段环空段分别求解,各段两端温度值作为边界条

件,采用数值方法即可求得钻井液循环时的深水温度分布。该温度预测模型结果准确度较高,但并未

考虑有隔水管增压排量的影响。

2.2 隔水管及增压排量的处理

考虑隔水管增压管线排量影响时涉及到突扩孔道^[8-11]的问题,根据变孔道速度模型,连续性方程为:

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0 \quad (5)$$

动量方程:

$$\rho_a \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{V} = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} \quad (6)$$

式中: ∇ 为哈密顿算子; \mathbf{V} 为速度矢量, m/s; p 为压力, Pa; $\boldsymbol{\tau}$ 为偏应力张量, Pa。

本构方程:

$$\boldsymbol{\tau} + \lambda \dot{\boldsymbol{\tau}} = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} \quad (7)$$

式中: $\dot{\boldsymbol{\tau}}$ 为附加应力张量的 Oldroyd 逆变微商; λ 为松弛时间, s。

采用数值方法,可求得 Q_1 和 Q_2 混合后隔水管内的流场分布。由该速度分布结果可知,考虑突扩管道因素时,计算出的流体混合后的速度大于未考虑该因素时的速度。令隔水管内排量仅 Q_1 时循环到海底环空段钻井液温度为 T_{a1} ,在隔水管内稳定流速为 v_1 ;只有隔水管增压排量 Q_2 时海水环空段钻井液温度为 T_{a2} ,在隔水管内稳定流速为 v_2 。则式(3)中 $v = v_1 + v_2$ 。

海底处的边界条件:

$$T_a = \frac{Q_1 T_{a1} + Q_2 T_{a2}}{Q_1 + Q_2} \quad (8)$$

以式(8)作为新的边界条件,将 $v = v_1 + v_2$ 代入,可微分求解式(3)(式(1)、(2)的求解与上述相同)。简易的单次循环流程如图2所示。

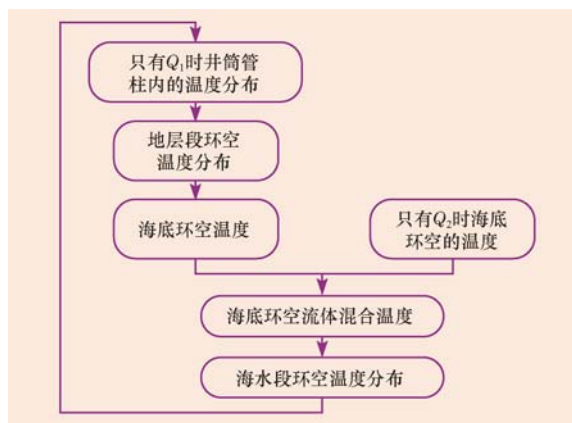


图2 差分方程求解的单次循环流程

Fig. 2 Flow chart in single cycle of the solution of differential equation

每次的数值求解都按图2所示步骤进行,即可求得有隔水管增压管线排量情况下深水井筒流体温

度的分布结果。从结果看,由于考虑了突扩管道因素,隔水管底部流体混合后的速度大于未考虑该因素时的速度,导致在隔水管底部附近钻井液温度值比未考虑该因素时略大。

3 温度分布计算实例

取南海某井的数据进行试算:井深3 996 m,水深1 481 m,套管内径220.5 mm,钻头直径311.1 mm,钻杆外径149.2 mm,钻井液排量42.6 L/s,钻井液密度1.086 kg/L,岩屑密度2.520 kg/L,钻井液、海水、地层岩石的比热分别为1 675,3 890和837 J/(kg·℃),导热系数分别为1.73,0.58和2.25 W/(m·℃)。采用PFMX钻井液,管柱入口温度27℃。

3.1 无隔水管增压排量时的井筒流体温度分布

图3为该井未加隔水管排量时,钻井液循环、井筒流体温度达到稳定时的温度分布,并且图示了井筒周围海水与地层温度分布情况。

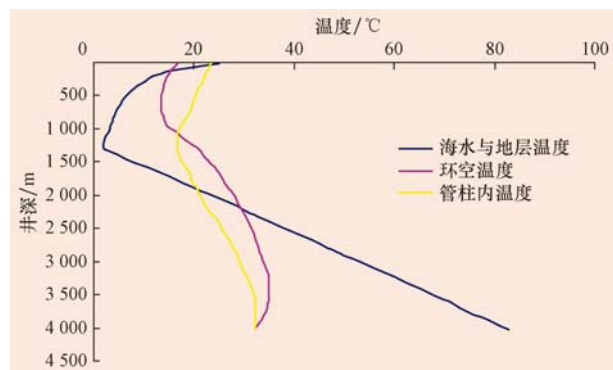


图3 深水井筒流体温度分布

Fig. 3 Fluid temperature distribution in deep-water borehole

3.2 有隔水管增压排量时的井筒流体温度分布

根据现场使用隔水管增压管线泵的可提供排量,研究了不同隔水管增压排量下的井筒流体温度分布,并分别提取各增压排量下管柱内和环空的温度数据,研究了其变化规律,如图4、图5所示。

由图4、图5可知,井筒流体温度分布受隔水管增压排量的影响显著,其温度改变幅度及影响范围随排量增大而增大。在一定井深范围内,有隔水管增压排量下的井筒流体温度分布较未加隔水管补充排量时发生了明显变化。例如在增压排量为0和20 L/s情况下,同一井深处,环空最大温

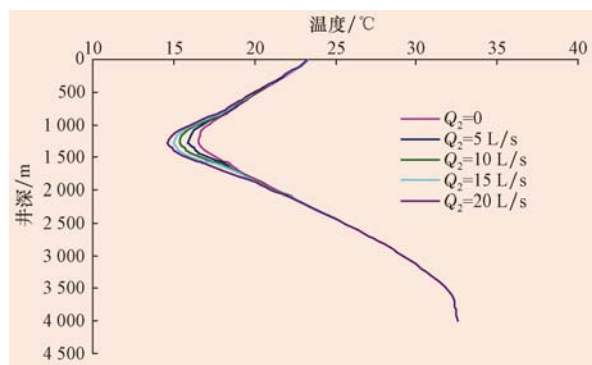


图 4 不同隔水管增压排量下的管柱内温度分布比较

Fig. 4 Fluid temperature distribution in pipe string with boosted flow in riser

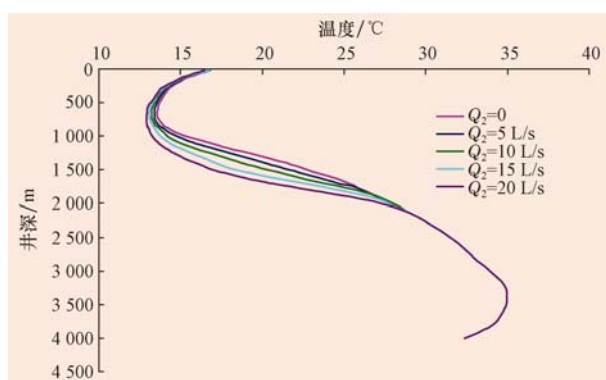


图 5 不同隔水管增压排量下的环空温度分布比较

Fig. 5 Fluid temperature distribution in annulus with boosted flow in riser

差达 5.7 °C, 管柱内也接近 2.0 °C。

隔水管增压排量对环空温度分布影响较大, 且能影响到较浅水深范围, 在增压排量为 0 和 20 L/s 情况下, 井深 556 m (属海水段) 处超过 0.5 °C, 而管柱内温差还不到 0.1 °C; 对管柱内温度分布影响较小, 且能影响到较深的井深范围, 在增压排量为 0 和 20 L/s 情况下, 在井深 2 110 m 处, 环空温差几乎为 0, 管柱内仍有 0.18 °C 的温差。

3.3 隔水管增压排量对井筒流体温度分布的影响

隔水管增压排量对隔水管底部流体和隔水管环空流体温度的影响规律分别如图 6、图 7 所示 (图中纵坐标表示井筒某深度处有隔水管增压排量下的流体温度与未加增压排量时的温度之差)。

由图 6、图 7 可知, 隔水管底部流体温度大小随隔水管增压排量增大呈线性减小趋势, 逐渐远离隔水管底端时 (从水深 1 100 m 到 800 m), 进行线性拟合后发现, 相关系数 R^2 值逐渐减小, 非线

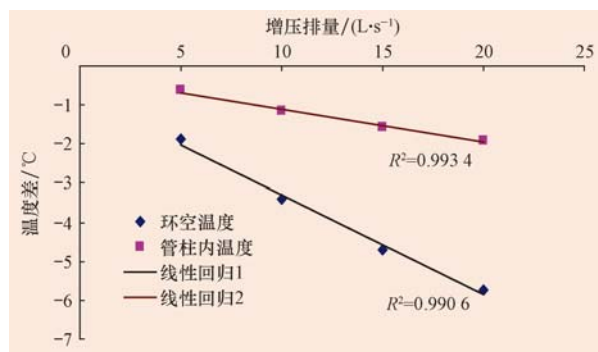


图 6 隔水管增压排量对隔水管底部流体温度的影响

Fig. 6 Influence of fluid temperature at bottom of the riser with boosted flows

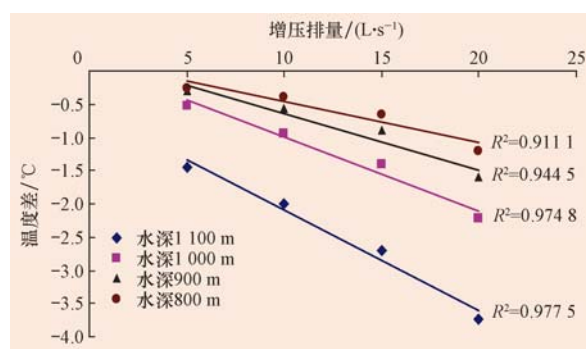


图 7 隔水管增压排量对隔水管环空流体温度的影响

Fig. 7 Influence of fluid temperature in annulus of the riser with boosted flows

性趋势逐渐增加, 说明距隔水管底部越远, 隔水管环空流体温度随增压排量的增大而减小得越明显, 这也证明了“增压排量越大, 对井筒流体温度影响范围越大”的正确性。

4 结 论

1) 研究深水井筒流体温度分布时, 隔水管增压排量的影响较大, 在实际应用中必须予以考虑。考虑隔水管形成突扩孔道流动因素时, 在隔水管底部附近, 计算的钻井液温度值比未考虑该因素时略大。

2) 增压排量对环空内井筒流体温度分布影响较管柱内更为明显; 因钻井液所处位置、流动方向不同, 与环空相比, 管柱内钻井液温度受增压排量的影响更深。

3) 隔水管增压排量对隔水管底部流体温度的影响呈线性规律, 远离隔水管底端时, 隔水管环空流体温度随增压排量的增大而减小的趋势越明显。

参 考 文 献

References

- [1] Keller H H, Couch E J, Berry P M, et al. Temperature distribution in circulating mud columns[J]. SPE Journal, 1973, 13(1): 23-30.
- [2] Rornero J, Touboul E. Temperature prediction for deepwater wells: a field validated methodology[J]. SPE 49056, 1998.
- [3] 高永海, 孙宝江, 王志远, 等. 深水钻探井筒温度场的计算与分析[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2008, 32(2): 58-62.
Gao Yonghai, Sun Baojiang, Wang Zhiyuan, et al. Calculation and analysis of wellbore temperature field in deepwater drilling [J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2008, 32(2): 58-62.
- [4] 路继臣, 任美鹏, 李相方, 等. 深水钻井气体沿井筒上升的膨胀规律[J]. 石油钻探技术, 2011, 39(2): 35-39.
Lu Jichen, Ren Meipeng, Li Xiangfang, et al. Expansion characteristics of uprising gas along wellbore in deepwater drilling [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2011, 39(2): 35-39.
- [5] Gonzalez M E, Bloys J B, Lofton J E, et al. Increasing effective fracture gradients by managing wellbore temperatures[R]. IADC/SPE 87217, 2004.
- [6] Zijlsing D H. Analysis of temperature distribution and performance of polycrystalline diamond compact bits under field drilling conditions[R]. SPE 13260, 1984.
- [7] 崔猛, 翟应虎, 于洋, 等. 钻头机械能对深水钻井井筒温度场的影响分析[J]. 石油机械, 2010, 38(11): 23-27.
Cui Meng, Zhai Yinghu, Yu Yang, et al. The effect of the mechanical energy of the drill bit on the temperature field in deep-water borehole[J]. China Petroleum Machinery, 2010, 38(11): 23-27.
- [8] Yin Hongjun, Zhong Huiying, Fu Chunquan, et al. Numerical simulations of viscoelastic flows through one slot channel[J]. Journal of Hydrodynamics: Series B, 2007, 19(2): 210-216.
- [9] 尹洪军, 钟会影, 王洪涛, 等. 扩张流道内修正上随体 Maxwell II 粘弹性流体的流动[J]. 特种油气藏, 2005, 12(4): 36-39.
Yin Hongjun, Zhong Huiying, Wang Hongtao, et al. Flow of modified upper-converted viscoelastic fluid in expansionary channel[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2005, 12(4): 36-39.
- [10] 姜海梅, 尹洪军, 苏宇驰, 等. 用有限体积法对粘弹性流体的扩张流动进行数值模拟[J]. 特种油气藏, 2009, 16(1): 75-78.
Jiang Haimei, Yin Hongjun, Su Yuchi, et al. Numerical simulation of expansion flow of viscoelastic fluid by using finite volume method[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2009, 16(1): 75-78.
- [11] 张立娟, 岳湘安, 刘中春, 等. 粘弹性流体在盲端孔隙中的流场[J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 2002, 17(6): 748-755.
Zhang Lijuan, Yue Xiang'an, Liu Zhongchun, et al. Flow field of viscoelastic fluid in pores with dead ends[J]. Journal of Hydrodynamics: Series A, 2002, 17(6): 748-755.

欢迎订阅 2012 年《石油钻探技术》

《石油钻探技术》创刊于 1973 年,是由中国石油化工集团公司主管、中国石化集团石油工程技术研究院主办的科技期刊,是全国中文核心期刊和历年中国科技论文统计源刊,被美国《石油文摘》、《中国石油文摘》和《中国地质文摘》等大量摘录。国内连续出版物号:CN11-1763/TE,国际连续出版物号:ISSN1001-0890。

《石油钻探技术》主要报道国内石油工程(包括钻井、钻井液、固井、完井、开采等专业)以及钻采机械设备与自动化方面的科技进展和现场经验,适当介绍国外石油工程技术发展的水平和动向本刊栏目为:专家视点、钻井完井、油气开采、钻采机械、现场交流、科技信息。适合于广大石油工程技术人员、石油类高等院校师生和油田企业经营者阅读。

《石油钻探技术》为双月刊,大 16 开版本,逢单月末出版。2012 年每期定价 15 元(含邮寄费),全年 6 期共 90 元。自办发行,邮汇与电汇均可。欢迎有关单位和个人及时订阅,可破季订阅。订阅办法:

1. 登录本刊网站(<http://www.syzt.com.cn>)下载期刊订阅单,认真填写订阅单及汇款单,切勿潦草,以免因地址不详而无法邮寄。

2. 银行汇款:工行北京市海淀支行,帐号 0200049629200702219,户名“中国石油化工股份有限公司石油工程技术研究院”,开户行代码 102100004960,并注明“期刊”字样。

3. 邮局汇款:北京市朝阳区北辰东路 8 号北辰时代大厦 710 室,邮编 100101,收款人:刘文臣。

联系电话:010-84988356,84988317;传真:010-84988316;E-mail: syzt@vip.163.com。