

文章编号: 0253-2697(2010)05-0858-05

偏心环空层流顶替滞留层边界位置研究

冯福平¹ 艾 池¹ 杨丰宇² 孟 翔² 钟 鑫²

(1. 东北石油大学提高油气采收率教育部重点实验室 黑龙江大庆 163318; 2. 大庆钻探工程公司钻井二公司 黑龙江大庆 163413)

摘要: 水泥浆顶替过程中环空边界处的泥浆所受的剪应力最大,随着顶替界面从环空最大流速位置处逐渐向两边扩展,泥浆层各处所受的剪应力逐渐减小,直到环空边界处的剪应力等于泥浆的动切力,顶替界面不再扩展,形成稳定的顶替边界。根据水泥浆顶替泥浆过程中顶替界面达到稳定的平衡条件,建立了偏心环空不同周向角下套管和井壁处的泥浆滞留层边界位置计算模型,通过计算表明:随着套管偏心度的增大,宽间隙处的剖面顶替效率变化不大,而窄间隙处的剖面顶替效率却急剧下降,易形成泥浆窜槽;泥浆滞留层首先在井壁处出现,井壁处的泥浆滞留层厚度和范围要明显高于套管处,严重影响第二胶结面固井质量,应重点加强第二胶结面顶替效率和固井质量技术的研究。

关键词: 偏心环空;滞留层;边界位置;剪应力;顶替界面;宾汉流体

中图分类号: TE256 文献标识码: A

A study on the replacement position of laminar flow in eccentric annulus at retention layer boundaries

FENG Fuping¹ AI Chi¹ YANG Fengyu² MENG Xiang² ZHONG Xin²

(1. Key Laboratory for Enhancing Oil Recovery of the Ministry of Education, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, China; 2. No. 2 Drilling Company, Daqing Drilling & Exploration Engineering Company, Daqing 163413, China)

Abstract: The cement slurry at boundaries of annulus suffers the maximum shear stress in the process of replacement, as the replacement interface expands little by little from the maximum velocity position of annulus to both sides, the shear stress that mud layer suffers everywhere is gradually decreasing until the shear stress at boundaries of annulus is equal to the mud shear force, then as the expansion stops, a stable replacement interface is formed. Based on equilibrium conditions for the stabilization of the replacement interface, the present paper developed a model to calculate boundaries and thickness of mud retention layers at sidewalls and casing depths with different circumferential angles in eccentric annulus. The calculation showed that with the increase of casing eccentricity, the displacement efficiency at the wide gap changed little, while that at the narrow gap was falling sharply and mud channeling was more readily to form. Mud retention layers occurred first at sidewalls where the thickness and extent of retention layers were much greater than at casing depths, which significantly affected the cementing quality of the second cementation surface. Therefore, researches on the replacement efficiency of the second cementation surface and on techniques to guarantee cementing qualities should be strengthened.

Key words: eccentric annulus; retention layer; boundary position; shear stress; replacement interface; Bingham fluid

有效地驱替钻井液提高顶替效率是防止钻井液窜槽、保证水泥浆胶结质量和水泥环密封效果的基本前提。固井顶替效率的影响因素众多,目前关于顶替效率的研究主要采用室内实验和现场数据统计两种方法,分别得到了固井流体性能、固井施工参数对顶替效率的影响规律以及顶替效率的统计计算方法^[1-6],但是对于顶替过程中泥浆滞留层边界位置的定量描述还很少。注水泥固井是一个水泥浆取代泥浆逐渐填充环空间隙的过程,随着接触时间的增大,顶替界面逐渐向两

边扩展,即通过描述水泥浆顶替泥浆过程中顶替界面的动态扩展过程,对偏心环空层流顶替时井壁和套管处的泥浆滞留层边界位置进行研究。

1 宾汉流体顶替界面剪应力分布

水泥浆流动会对泥浆产生剪应力,流体剪应力既是阻碍水泥浆运动的阻力,也是驱动泥浆运动的动力^[7],因此流体运动过程中产生的界面剪应力是影响顶替效率的主要因素,同时也可以用来反映固井施工

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 50974028)“水力压裂岩体损伤演化与微裂缝形成机理研究”和黑龙江省教育厅科学技术研究项目(11531001)“天然气井防气窜封堵技术研究”联合资助。

作者简介: 冯福平,男,1982年11月生,2005年毕业于大庆石油学院石油工程专业,现为东北石油大学讲师,在读博士研究生,主要从事油气井工程力学方面的教学和科研工作。E-mail: fengfuping2005@163.com

参数、固井流体性能等对顶替效率的综合影响。

钻井液与水泥浆的顶替流动非常复杂,为了将问题进行简化,在此作如下假设:①直井、水泥浆与泥浆直接接触;②泥浆和水泥浆均属宾汉流体,层流顶替,且顶替过程中壁面无滑移;③忽略界面处的混掺、扩散及水泥浆、钻井液接触后的化学作用等因素对顶替流动的影响^[8];④不考虑泥饼的存在。

图 1 为环空水泥顶替剖面图。其中 R_1 为环空内径, R_2 为环空外径, r_0 为流核内径, R_0 为流核外径, r_2, r_3 为某一时刻水泥浆与泥浆的交界面, r_1, r_4 分别为靠近套管一侧和靠近井壁一侧的泥浆层中任一位置, θ 为所取的剖面角度。

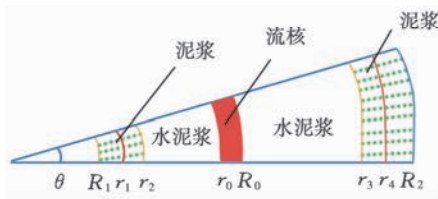


图 1 环空水泥浆顶替剖面图

Fig. 1 Cement slurry replacement section in annulus

根据宾汉流体流动特性可知,流核宽度与流体屈服应力和压力梯度之间的关系为^[9]

$$\frac{\Delta p}{\Delta L}(R_0 - r_0) = 2\tau_0 \quad (1)$$

式中: τ_0 为屈服应力, Pa; $\Delta p/\Delta L$ 为压力梯度, Pa/cm。

由流体平衡微分方程可得宾汉流体在环空中流动时的剪应力分布为

$$\tau = \left(\frac{\Delta p}{2\Delta L}r_0 + \tau_0 \right) \frac{r_0}{r} - \frac{\Delta p}{2\Delta L}r \quad r \leq r_0 \quad (2)$$

$$\tau = \left(\tau_0 - \frac{\Delta p}{2\Delta L}R_0 \right) \frac{R_0}{r} + \frac{\Delta p}{2\Delta L}r \quad r \geq R_0 \quad (3)$$

2 层流顶替滞留层边界位置计算模型

水泥浆顶替泥浆是一个水泥浆逐渐充满环空的过程,在剪应力的作用下,顶替首先从最大流速位置处开始,随着接触时间的增加顶替界面逐渐向两边扩展,直到某一时刻,形成稳定的顶替边界,环空最大限度的充满了水泥浆,顶替效率达到了最大值,其顶替过程如图 2 所示。

取靠近套管一侧顶替界面未达到稳定时的泥浆层作为分析对象,此时虽然钻井液未被水泥浆顶替,但其受顶替压力、界面剪应力和两种流体密度差所产生的浮力的共同作用。对 r_1 到 r_2 之间高度为 ΔL 的泥浆层微元体进行受力分析,其力学模型如图 3 所示。

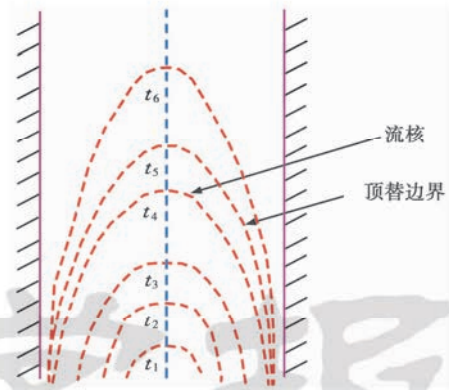


图 2 环空顶替界面随时间变化示意图

Fig. 2 Change of the replacement boundary in annulus with time

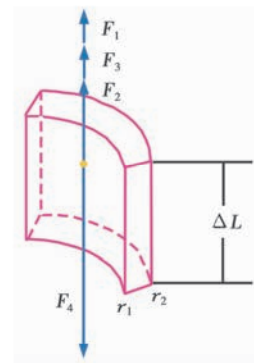


图 3 泥浆层微元体受力分析

Fig. 3 Stressed analysis on mud layer infinitesimal

设 τ_1 为 r_1 处泥浆所承受的剪应力; S 为微元体横截面积; S_1 为微元体内壁表面积; S_2 为外壁表面积; Δp 为上下截面的压差; ρ_1 为泥浆密度; ρ 为水泥浆密度,则该微元体所受的驱替压差力 F_1 、密度差所引起的浮力 F_2 、水泥浆流动对泥浆所产生的壁面剪切力 F_3 以及泥浆内部阻碍流动的壁面剪切力 F_4 分别为:

$$F_1 = \Delta p S = \Delta p (r_2^2 - r_1^2) \frac{d\theta}{2} \quad (4)$$

$$F_2 = (r_2^2 - r_1^2) (\rho - \rho_1) g \Delta L \frac{d\theta}{2} \quad (5)$$

$$F_3 = \tau_2 S_2 = \tau_2 r_2 d\theta \Delta L = \left[\left(\frac{\Delta p}{2\Delta L}r_0 + \tau_0 \right) r_0 - \frac{\Delta p}{2\Delta L}r_2^2 \right] d\theta \Delta L \quad (6)$$

$$F_4 = \tau_1 r_1 d\theta \Delta L \quad (7)$$

根据微元体受力平衡关系,有

$$F_1 + F_2 + F_3 = F_4 \quad (8)$$

整理可得

$$\tau_1 = \frac{(r_2^2 - r_1^2) \left(\frac{\Delta p}{\Delta L} - \rho_1 g + \rho g \right) + \frac{\Delta p}{\Delta L} (R_0 r_0 - r_2^2)}{2r_1} \quad (9)$$

从式(9)可以看出, r_1 越小, τ_1 越大, 即套管处的泥浆层所承受的剪切力最大, 因此泥浆若要流动的话, 应该是套管处的泥浆先流动。但实际顶替过程中, 不会出现套管处泥浆先流动这种情况, 因为流体总是从其所受阻力最小的位置开始流动, 在力传到套管处之前, 顶替界面 r_2 处的泥浆层所受的剪应力已经大于其动切力, 就先流动起来, 这样就要重新界定 r_2 , 进行新的受力分析。因此, 随着顶替接触时间的增大, 顶替边界从环空最大流速位置处逐渐向两边扩展, 水泥浆与泥浆交界面逐渐扩大, 环空边界处泥浆层所受的剪应力逐渐减小, 直到等于泥浆的动切力 τ_{0i} , 即:

$$\tau_1 = \tau_{0i} \quad (10)$$

此时顶替界面达到稳定, 由于泥浆克服不了自身的黏滞力, 顶替界面不再扩展, 形成稳定的顶替边界, 从顶替边界到套管处的泥浆就真正滞留下来。根据水泥浆顶替泥浆过程中顶替界面达到稳定时的平衡条件即可得到套管处泥浆滞留层边界为

$$r_2 = \sqrt{\frac{2R_1\tau_{0i} - \frac{\Delta p}{\Delta L}(R_0r_0 - R_1^2)}{(\rho g - \rho_i g)} + R_1^2} \quad (11)$$

采用同样的分析方法对靠近井壁一侧的泥浆层进行受力分析, 可得到井壁处泥浆滞留层边界位置 r_3 为

$$r_3 = \sqrt{\frac{\frac{\Delta p}{\Delta L}(R_2^2 - R_0r_0) - 2R_2\tau_{0i}}{(\rho g - \rho_i g)} + R_2^2} \quad (12)$$

3 偏心环空泥浆滞留层厚度及顶替效率计算模型

偏心环空宽窄间隙处的流动阻力不同, 往往宽间隙处泥浆接近完全顶替, 而窄间隙处泥浆只有部分被驱替甚至完全不流动, 偏心环空窄间隙处基本都会存在泥浆的滞留, 其滞留区域与井身参数、固井流体性能、固井施工参数等有关^[10]。泥浆滞留层的存在极易引起钻井液窜槽和环空密封失效, 导致后期压裂或是生产过程中出现层间窜通和管外冒气的现象, 给油气井生产带来巨大的经济损失^[11]。

3.1 不同偏心度下滞留层厚度及顶替效率计算模型

(1) 不同偏心度下滞留层厚度。环空内径 R_1 在偏心环空中是井眼周向角度的函数, 取宽间隙处为坐标原点, 偏心环空中任一角度下环空内径由下式计算:

$$R_1 = \sqrt{R^2 - \epsilon^2(R_2 - R)^2 \sin^2 \phi} - \epsilon(R_2 - R) \cos \phi \quad (13)$$

式中: R 为套管外径, cm; ϵ 为套管偏心度; ϕ 为剖面周向角, ($^\circ$)。

不同周向角下套管处泥浆滞留层厚度为

$$h_1 = r_2 - R_1 = \sqrt{\frac{2R_1\tau_{0i} - \frac{\Delta p}{\Delta L}(R_0r_0 - R_1^2)}{\rho g - \rho_i g} + R_1^2} - R_1 \quad (14)$$

不同周向角下井壁处泥浆滞留层厚度为

$$h_2 = R_2 - r_3 = R_2 - \sqrt{\frac{\frac{\Delta p}{\Delta L}(R_2^2 - R_0r_0) - 2R_2\tau_{0i}}{(\rho g - \rho_i g)} + R_2^2} \quad (15)$$

(2) 偏心环空顶替效率计算模型。知道了任意角度下的泥浆层滞留位置, 根据井眼几何关系即可推导出不同周向角下的剖面顶替效率和环空截面整体顶替效率。

任一一周向角下的剖面顶替效率 η_p 为

$$\eta_p = \frac{\pi(r_3^2 - r_2^2)}{\pi(R_2^2 - R_1^2)} = 1 - \frac{2\tau_{0i} - \frac{\Delta p}{\Delta L}(R_2 - R_1)}{(R_2 - R_1)(\rho g - \rho_i g)} \quad (16)$$

环空截面的整体顶替效率为

$$\eta_s = \frac{\int_0^{2\pi} (r_3^2 - r_2^2) d\phi}{\int_0^{2\pi} (R_2^2 - R_1^2) d\phi} = \frac{\int_0^{2\pi} (R_2 + R_1) \left[\frac{\frac{\Delta p}{\Delta L}(R_2 - R_1) - 2\tau_{0i}}{\rho g - \rho_i g} + R_2 - R_1 \right] d\phi}{\int_0^{2\pi} (R_2^2 - R_1^2) d\phi} \quad (17)$$

3.2 模拟计算

取基础数据为: $\tau_0 = 2 \text{ Pa}$, $\tau_{0i} = 20 \text{ Pa}$, $\Delta p / \Delta L = 10 \text{ Pa/cm}$, $\rho = 1.9 \text{ g/cm}^3$, $\rho_i = 1.2 \text{ g/cm}^3$, $R = 6.985 \text{ cm}$, $R_2 = 11 \text{ cm}$, 对偏心环空不同周向角下的套管和井壁处泥浆滞留层厚度以及顶替效率进行了计算, 如图 4 和表 1 所示。

由计算结果可知: 随着偏心度增大, 窄间隙附近的泥浆滞留层厚度和范围不断增加, 剖面顶替效率急剧下降, 说明在窄间隙一定范围内会形成连续的泥浆窜槽区域, 严重影响水泥胶结质量, 对后期油气井生产埋下了不可忽视的隐患; 泥浆滞留层首先在井壁处出现, 井壁处的泥浆滞留层厚度和范围要明显大于套管处的泥浆滞留层, 即第二胶结面的固井质量要远远低于第一胶结面的固井质量, 这也很好的解释了目前在油田实际生产中出现的第二胶结面固井质量优质的情况下仍然会发生层间窜漏的现象, 因此应重点加强第二胶结面顶替效率及固井质量的研究工作。

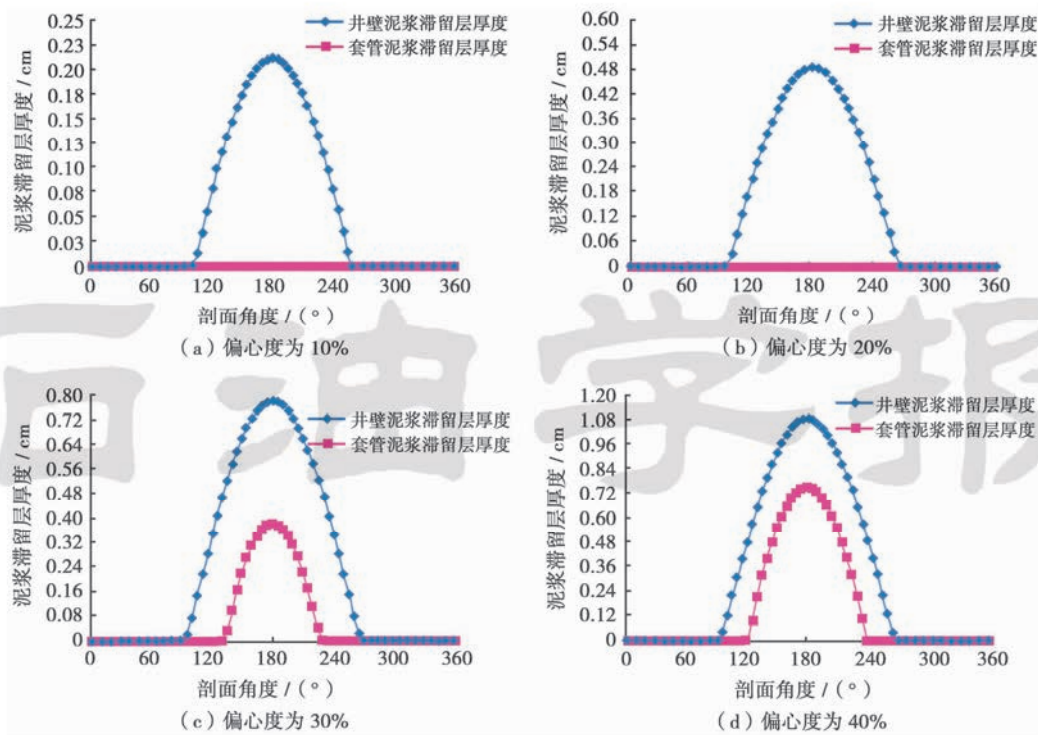


图 4 不同偏心度下泥浆滞留层厚度分布

Fig. 4 Thickness distribution of mud retention layer in different eccentricity

表 1 不同偏心度下剖面顶替效率和整体顶替效率计算结果

Table 1 Calculations of section and whole displacement efficiency in different eccentricity

偏心度/ %	剖面顶替效率/%							整个截面 顶替效率/ %
	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°	
10	100	100	100	100	96.81	93.49	91.76	96.56
20	100	100	100	99.61	92.57	82.07	73.32	92.19
30	100	100	100	99.08	84.30	69.91	52.19	86.35
40	100	100	100	98.27	77.36	42.29	22.92	75.27

采用上述模型对大庆油田莺深 2 井生产套管双级注水泥和宋深 7 井技术套管顶替效率进行了计算。其中莺深 2 井套管偏心度为 15%，实际顶替效率为：一级 83%，二级 93.4%。计算顶替效率为：一级 86.59%，二级 96.8%。宋深 7 井技术套管偏心度为 10%，实际顶替效率为 95.27%，计算顶替效率为 97.34%。顶替效率预测平均准确率为 96.62%，说明笔者所建立的偏心环空泥浆滞留层边界位置以及顶替效率计算模型具有较高的准确性，能够真实反映环空泥浆滞留的分布形态，满足工程实际要求。

4 结论

(1) 随着顶替界面从最大流速位置处逐渐向两边扩展，泥浆层各个位置所受的剪应力逐渐减小，直到环

空边界处的剪应力等于泥浆的动切力，剩余泥浆克服不了自身的黏滞力，顶替界面不再扩展，形成稳定的顶替边界，环空中最大限度地充满了水泥浆，顶替效率达到最大值。

(2) 根据水泥浆顶替过程中顶替界面达到稳定的平衡条件，得到了偏心环空不同周向角下套管和井壁处的泥浆滞留层厚度以及范围。

(3) 偏心环空宽间隙处的剖面顶替效率随着偏心度的增大变化不大，而窄间隙处的剖面顶替效率却急剧下降，易形成钻井液窜槽通道，应尽可能的提高套管居中度。

(4) 泥浆滞留层首先在井壁处出现，并且井壁处的泥浆滞留层厚度和范围要明显高于套管处，导致第二胶结面固井质量明显下降，应重点加强第二胶结面顶替效率和固井质量技术的研究。

参 考 文 献

[1] 陈家琅, 黄匡道, 刘永建, 等. 定向固井井注水泥顶替效率研究[J]. 石油学报, 1990, 11(3): 98-105.
Chen Jialang, Huang Kuangdao, Liu Yongjian, et al. Displacement efficiency of cementing in directional wells[J]. Acta Petrolei Sinica, 1990, 11(3): 98-105.

[2] Smith T R, Ravi R M. Investigation of drilling fluid properties to maximize cement displacement efficiency[R]. SPE 22775. 1991.

[3] Beirute R M, Sabins F L, Ravi K M. Large-scale experiments

- show proper hole conditioning: A critical requirement for successful cementing operations[J]. SPE 22774, 1991.
- [4] 张兴国, 许树谦, 陈若铭, 等. 紊流顶替和接触时间对顶替效率的影响[J]. 西部探矿工程, 2005, 17(2): 74-75.
Zhang Xingguo, Xu Shuqian, Chen Ruoming, et al. The effects of flow pattern and contact time on cementing displacement[J]. West-China Exploration Engineering, 2005, 17(2): 74-75.
- [5] 万发明, 吴广兴, 高大勇. 小井眼固井顶替效率研究[J]. 石油学报, 2000, 21(5): 72-76.
Wan Faming, Wu Guangxing, Gao Dayong. Experimental investigation on cementing displacement efficiency of slimhole well[J]. Acta Petrolei Sinica, 2000, 21(5): 72-76.
- [6] 刘崇建, 刘孝良, 刘乃震, 等. 提高小井眼水泥浆顶替效率的研究[J]. 天然气工业, 2003, 23(2): 46-49.
Liu Chongjian, Liu Xiaoliang, Liu Naizhen, et al. Research on raising slurry displacing efficiency in a slim hole[J]. Natural Gas Industry, 2003, 23(2): 46-49.
- [7] 陈志学, 寇明富, 于文华, 等. 水泥浆在井壁上的剪应力对固井质量的影响研究[J]. 石油钻探技术, 2004, 32(2): 27-29.
Chen Zhixue, Kou Mingfu, Yu Wenhua, et al. Effects of shear stress of cement slurries adhering to walls on cementing qualities[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2004, 32(2): 27-29.
- [8] 高永海, 孙宝江, 刘东清, 等. 环空水泥浆顶替界面稳定性数值模拟研究[J]. 石油学报, 2005, 26(5): 119-122.
Gao Yonghai, Sun Baojiang, Liu Dongqing, et al. Numerical simulation on stability of cement displacement interface in annulus[J]. Acta Petrolei Sinica, 2005, 26(5): 119-122.
- [9] 李兆敏, 王渊, 张琪. 宾汉流体在环空中流动时的速度分布规律[J]. 石油学报, 2002, 23(2): 87-91.
Li Zhaomin, Wang Yuan, Zhang Qi. The law of velocity distribution of bingham fluid's flowing in the encircle pipe[J]. Acta Petrolei Sinica, 2002, 23(2): 87-91.
- [10] 邓建民. 固井钻井液零滞留临界静切力计算方法[J]. 天然气工业, 2008, 28(5): 72-73.
Deng Jianmin. A calculation method on critical gel strength of drilling fluids for cementing without drilling fluid retention[J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(5): 72-73.
- [11] 顾军, 杨卫华, 秦文政, 等. 固井二界面封隔能力评价方法研究[J]. 石油学报, 2008, 29(3): 451-454.
Gu Jun, Yang Weihua, Qin Wenzheng, et al. Evaluation method for isolation ability of cement-formation interface[J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 29(3): 451-454.

(收稿日期 2010-01-05 改回日期 2010-03-29 编辑 张怡)

关于维护科技道德、加强自律的联合公告

为了加强科技界精神文明建设, 提高科技工作者和编辑部工作人员的职业道德水平, 保障我国科技事业的健康发展, 《石油学报》、《石油勘探与开发》、《天然气工业》、《石油地球物理勘探》、《新疆石油地质》、《天然气地球科学》、《海相油气地质》、《特种油气藏》、《油气地质与采收率》、《石油实验地质》、《大庆石油地质与开发》、《中国海上油气》、《钻井液与完井液》、《测井技术》、《中国石油大学学报(自然科学版)》、《国外测井技术》、《石油工业计算机应用》、《石油钻采工艺》、《断块油气田》、《油气储运》、《石油与天然气地质》、《中国石油勘探》、《石油物探》等编辑部经过认真讨论, 决定联合发表如下公告:

1. 提倡追求真理、实事求是、团结协作、诚实劳动; 坚持学术民主, 鼓励百家争鸣, 尊重他人劳动成果, 严肃政治纪律, 坚决反对伪科学。

2. 严格执行审稿制度, 不循私情, 不登人情稿, 公正廉洁。

3. 维护投稿人的权益, 一般在规定的期限内(收到稿件的3个月内)对来稿是否采用予以答复。

4. 拒绝刊登署名有争议、引用他人著述未注明出处、在上述规定的期限内一稿两投或多投的稿件。

5. 对弄虚作假、抄袭剽窃和一稿两投或多投者, 一经查实, 相关编辑部视其情节轻重分别给予书面警告、通知其所在单位、3年内拒绝刊登有其署名的任何稿件、在所有签署本公告的期刊上公开曝光等处理。

6. 鼓励对上述所列违反道德规范的行为进行据实举报。强调编者、作者的诚信, 各编辑部尊重举报人的合理要求。

7. 对于严重违反科技工作者职业道德、情节严重、影响极坏的事件, 将转请有关部门进行严肃处理, 并在签署本联合公告的期刊范围内建立情况通报制度。

8. 本联合公报欢迎国内能源界科技期刊加盟。

本联合公报于各期刊编辑部签署并在期刊上刊出后生效。