

# 颗粒尺度下砂岩出砂几何约束条件及毛管束模型

聂向荣, 杨胜来, 章星, 丁景辰, 陈浩

中国石油大学(北京)石油工程教育部重点实验室, 北京 102249

**摘要** 对疏松砂岩油藏开发过程中的出砂问题进行研究,从细观尺度分析了砂岩颗粒的受力状态,明确了出砂的力学条件,提出砂岩出砂的3个几何约束条件。分析认为,力学条件及几何条件同时约束砂粒的运移。将地层孔隙用毛管束表示,通过分析流体和砂岩颗粒在毛管束中的受力情况,建立了砂岩出砂毛管束模型,推导出砂岩出砂临界流速公式。研究表明,砂粒直径、孔隙度和岩石颗粒摩擦角增大,临界流速增大;流体黏度增大,临界流速变小。建立的临界流速公式与实验结果对比,平均误差为15.9%,符合较好。砂岩出砂几何约束条件丰富了砂岩出砂机理,建立的临界流速公式简明,可方便应用于矿场实践。

**关键词** 砂岩;出砂;几何条件;力学条件;毛管束模型;临界流速

**中图分类号** TE343

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.06.008

## Geometrical Constraints and Capillary Bundle Model for Sand Production in Sandstone Reservoir at Particle Scale

NIE Xiangrong, YANG Shenglai, ZHANG Xing, DING Jingchen, CHEN Hao

Key Laboratory of Petroleum Engineering, Ministry of Education; China University of Petroleum, Beijing 102249, China

**Abstract** The sand production for loose sandstone reservoirs is studied. The stress conditions from the microscopic scale are analyzed with a clear understanding of the mechanical condition. Three geometrical constraints for the sand production are considered. For the reservoir to produce sands, the geometrical conditions and mechanical conditions must simultaneously be satisfied. The formation pore is expressed by the capillary bundle. The capillary bundle model for the sand production is established by analyzing the stress conditions between the fluid and the sand particles. A formula for the critical velocity is obtained. The critical velocity increases with the increase of the sand diameter, the porosity and the sand particle frictional angle. The critical velocity decreases with the increase of the viscosity. The formula gives results in a good agreement with experiments, and the average error is only 15.9%. This geometrical constraints are proposed which may help the mechanism of the sand production. The formula of the critical velocity presented in this paper can be used conveniently in the oil field.

**Keywords** sandstone; sand production; geometrical condition; mechanical condition; capillary bundle model; critical velocity

疏松砂岩存在胶结性差、结构疏松及强度小的特点,在油气田开采过程中容易出砂,对油气田开发产生不利影响,已引起广泛重视<sup>[1,2]</sup>。目前关于出砂问题的研究主要集中在两个方面:砂岩出砂机理定量表征、矿场出砂预测研究。目前砂岩出砂机理定量表征研究主要集中在力学分析、出砂影响因素及化学溶蚀胶结物等的室内实验机理研究,认为只要达到一定的破坏准则和化学溶蚀效果后,就会发生出砂<sup>[3-4]</sup>;

矿场出砂预测研究主要集中在实验、出砂理论分析模型、数值模拟等方法<sup>[5-10]</sup>。这些方法各有优缺点,相互补充,其中出砂理论分析模型法中的流固耦合模型分析法考虑了流体和岩石的相互作用,是目前发展迅速的一种预测方法,该耦合模型的强非线性导致数值求解困难、繁琐<sup>[11,12]</sup>。

国内外关于出砂条件的研究大都集中在破坏准则确定和岩石力学参数表征上,在颗粒尺度上进行受力分析较少,

收稿日期:2013-04-02;修回日期:2013-11-18

基金项目:国家科技重大专项基金(2011ZX05032-002)

作者简介:聂向荣,博士研究生,研究方向为油藏渗流机理,电子信箱:nxrcup@163.com

引用格式:聂向荣,杨胜来,章星,等.颗粒尺度下砂岩出砂几何约束条件及毛管束模型[J].科技导报,2014,32(6):54-58.

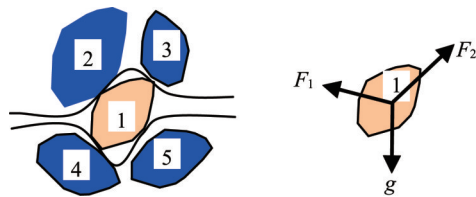
几乎所有关于出砂临界条件的研究都归结于是否满足一定的力学约束条件,忽略了影响出砂的另一必要条件——几何约束条件;毛管束模型不但能从孔隙尺度研究出砂问题,满足研究的精度问题,还能通过毛管束模型将管道的水力学规律引入到多孔介质渗流力学的计算中,将渗流力学中的微观参数用宏观的管道流体力学参数表征。为此,本文从颗粒细观尺度分析砂岩颗粒的受力状态,明确出砂的力学机理;提出砂岩出砂的3个几何约束条件,从颗粒尺度明确出砂必要条件;建立砂岩出砂毛管束模型,考虑流体和岩石的相互作用,推导便于应用的疏松砂岩出砂临界流速公式。

## 1 出砂约束条件

### 1.1 力学约束条件

砂岩地层出砂的主要力学破坏机理为剪切破坏和拉伸破坏,由于疏松砂岩内聚力小、抗剪切强度较低,当砂岩所受的应力超过其剪切强度时将发生剪切破坏或者屈服,岩石颗粒逐层剥离孔壁,产出固相。在流体流动时,沿程会与地层颗粒产生摩擦,摩擦力施加在岩石颗粒表面形成拖拽力,当拖拽力超过岩石的抗拉强度时,就会发生岩石破裂。一般来说这两种破坏是同时起作用、相互影响,地层剪切破坏表现为大量出砂,而拉伸破坏是缓慢出砂,具有自稳定性效应。

为了说明砂岩出砂的力学特征,现从颗粒细观角度分析砂岩颗粒的受力,砂岩颗粒在地层中的受力分析如图1所示。



$F_1$ —流体对颗粒的作用力; $F_2$ —周围颗粒的作用力; $g$ —重力

图1 砂岩颗粒受力示意

Fig. 1 Sandstone particle force diagram

图1中, $F_1$ 包括浮力、流体黏滞效应引起的摩擦力等; $F_2$ 包括颗粒间的摩擦力,由于颗粒表面电荷产生的范德华力及内聚力等<sup>[13]</sup>。因此,研究砂岩颗粒运移时,在细观颗粒尺度上运用牛顿第二定理对所有受力进行分析可得

$$g_i + \sum_{j=1}^n F_{2ij} + F_{1i} = m_i a_i \quad (1)$$

式中, $i$ 为分析受力的颗粒代号, $j$ 为与分析颗粒接触的颗粒代号, $n$ 为接触颗粒的个数, $m$ 为颗粒的质量, $a$ 为加速度。

加速度是颗粒受力后运动规律的体现,由加速度可以求得颗粒的速度、位移等参数,也可以根据动量定理及能量守恒定理求得和其他颗粒的碰撞运动趋势,从而得到下一时刻该颗粒的受力情况及运动轨迹。因此从颗粒尺度分析砂岩颗粒受力情况是十分必要且重要的。

### 1.2 几何约束条件

力仅是砂岩颗粒运移与否的必要条件之一,实际上砂岩能否运移到井底,还受砂岩颗粒所处的环境影响,这个环境就是砂岩颗粒所处的复杂多孔介质。为便于形象地表征地层环境对砂岩颗粒运移的影响,采用几何概念和几何图形直观表征地层几何环境对出砂的影响。

1) 岩石颗粒所受应力达到破裂准则,岩石颗粒将从岩石骨架上剥落并进入流动的流体中。从图2可以看出,只有在孔隙梯度 $\text{grad}\phi$ 方向上的驱动力才能引起颗粒的剥落和流动<sup>[8]</sup>,力 $f$ 在其他方向上的分量只能使得颗粒压缩或者膨胀甚至破碎,但若在该方向没有孔隙梯度,脱落破碎的砂岩颗粒也就无法进入流体流动。由此可见地层的孔隙梯度 $\text{grad}\phi$ 在压力梯度 $\text{grad}p$ 分量上的存在是影响砂岩颗粒能否“流动”的一个几何约束条件。

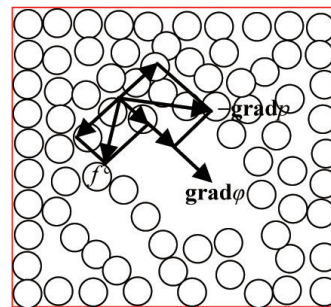


图2 砂岩颗粒孔隙梯度模型

Fig. 2 Sandstone particle porosity gradient movement model

2) 剥落的砂岩颗粒必须能够通过狭小的喉道,其孔喉模型如图3所示,砂粒的直径 $d_1$ 和喉道直径 $d_2$ 必须满足 $d_1 < d_2$ 。图3是简化的理想模型,实际上喉道和砂岩颗粒都是不规则的三维物体,因此实际砂岩颗粒应小于孔喉尺寸,这是决定砂岩颗粒能否“流过”狭小喉道的另一个几何约束条件。

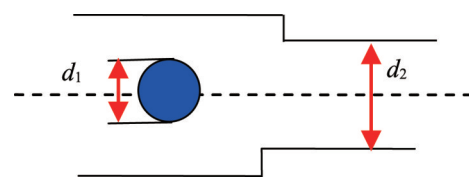


图3 孔喉模型

Fig. 3 Pore throat model

3) 剥落的砂岩颗粒在流体的携带作用下能够从地层流出,其整个孔隙空间必须连通,运移模型如图4所示,颗粒1运移通道连通,颗粒可以流出井底,形成出砂,而颗粒2流动通道不连通,颗粒只能在孔隙的一定范围内移动,甚至可能堵塞孔隙,阻止其他颗粒运动。由此可知孔隙空间的连通性是决定砂岩颗粒能否最终“流出”地层的又一个几何约束条件。

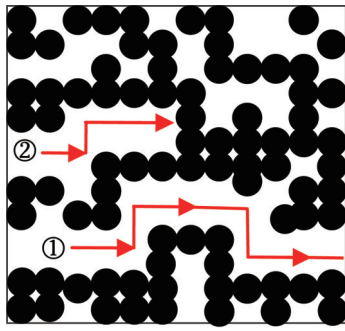


图4 砂岩颗粒运移模型

Fig. 4 Sandstone particle movement model

砂岩出砂一般情况下需要同时满足上述3个几何约束条件,通常这3个几何条件是相互关联的。本文描述的砂岩颗粒模型只是表征了某一时刻某一特定砂岩颗粒流出井底必备的几何条件,然而实际地层中岩石颗粒和流体的耦合作用十分复杂,砂岩颗粒处在释放-悬浮-捕获的动态过程中,因此地层岩石的几何分布也是动态变化的,而某一特定砂岩颗粒能否满足流出井底的几何条件也是动态变化的。

综上所述,地层出砂不但要满足一定的力学约束条件,使得砂岩颗粒从岩石骨架上剥落且要具有一定的运移能量,还必须满足一定的几何条件,使得砂岩颗粒具有一定的运移空间。

## 2 出砂毛管束模型

疏松砂岩颗粒在地层中运移的孔隙空间是十分复杂的,为便于研究,将地层用毛管束模型表示,通过研究流体和砂岩颗粒在毛管中的流动规律,将流体水力学特征和岩石固体力学特征结合起来,用来确定临界流速。

### 2.1 临界流速公式推导

将油层中的颗粒孔隙近似为半径为 $r_0$ 的毛管,流体在地层中的流动模型如图5所示。

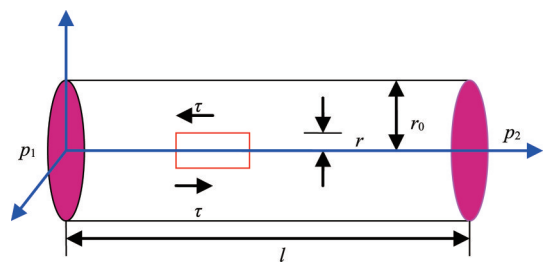


图5 毛管中流体流动示意

Fig. 5 Sketch of pipe flow

假设毛管中的流动为不可压缩定常流动,由层流基本方程可得

$$\tau = \mu \frac{du}{dr} = \frac{p_2 - p_1}{2l} r \quad (2)$$

式中, $\tau$ 为水流侧表面的剪切应力, $\mu$ 为动力黏度系数, $u$ 为速度, $r$ 为轴向距离, $p_1$ 和 $p_2$ 分别为毛管两端压力, $l$ 为毛管长度。

从式(2)可以得出,最大剪切应力为管壁处( $r=r_0$ ),因此最大剪切应力 $\tau_{\max}$ 可以表示为

$$\tau_{\max} = \frac{p_2 - p_1}{2l} r_0 \quad (3)$$

由牛顿内摩擦定律和毛管边界条件综合可求得毛管内平均流速 $u$ 为

$$u = \frac{p_2 - p_1}{8\mu l} r_0^2 \quad (4)$$

在油藏实际计算中,常用的不是孔隙的真实平均速度 $u$ ,而是其表观平均速度 $v$ ,两者之间的关系为

$$v = \varphi u = \frac{(p_2 - p_1)\varphi}{8\mu l} r_0^2 \quad (5)$$

由Darcy和Hagen-Poiseuille定律可以推出毛管半径 $r_0$

$$r_0 = \frac{\sqrt{8k\zeta}}{\varphi} \quad (6)$$

式中, $\zeta$ 为迂曲度, $k$ 为渗透率, $\varphi$ 为孔隙度。

由Carmen-Kozeny方程可得渗透率 $k$ 的表达式为

$$k = \frac{1}{72\zeta} \frac{\phi^3 d_p^2}{(1-\varphi)^2} \quad (7)$$

式中, $d_p$ 为岩石颗粒的直径。

将式(7)代入式(6)得毛管半径 $r_0$ 的表达式

$$r_0 = \frac{\varphi d_p}{3(1-\varphi)} \quad (8)$$

将式(8)分别代入式(5)和式(3)得

$$v = \frac{(p_2 - p_1)\varphi^3 d_p^2}{72\mu l(1-\varphi)^2} \quad (9)$$

$$\tau_{\max} = \frac{(p_2 - p_1)\varphi d_p}{6l(1-\varphi)} \quad (10)$$

将式(9)代入式(10)得到毛管中最大剪切应力和平均流速的关系为

$$\tau_1 = \tau_{\max} = \frac{12\mu(1-\varphi)}{\varphi^2 d_p} v \quad (11)$$

由于疏松砂岩的岩石颗粒粒径通常都大于100 μm,因此根据文献[13]可以知道临界剪切力主要取决于内摩擦力。就本研究对象而言,本文可以应用文献[13]中的临界剪切力表达式

$$\tau_{cr} = \frac{2(\gamma_s - \gamma_w)d_p \operatorname{tg} \theta}{3\alpha} \quad (12)$$

式中, $\tau_{cr}$ 为临界剪应力, $\gamma_s$ 为砂粒的容重, $\gamma_w$ 为流体的容重, $\theta$ 为岩石颗粒的摩擦角, $\alpha$ 为地层流体作用于岩石颗粒上的有效摩擦面积与最大截面积( $\pi d_p^2/4$ )之比。

当地层流体对砂岩颗粒产生的剪切应力大于砂岩颗粒破坏的临界剪应力时,砂岩颗粒将从母体分离,并被水流带走,比较式(10)和式(11)得

$$\frac{12\mu(1-\varphi)}{\varphi^2 d_p} v \geq \frac{2(\gamma_s - \gamma_w)d_p \operatorname{tg} \theta}{3\alpha} \quad (13)$$

于是得到疏松砂岩临界流速表达式

$$v_{cr} = \frac{(\gamma_s - \gamma_w)d_p^2 \lg \theta \varphi^2}{18\alpha\mu(1 - \varphi)} \quad (14)$$

### 2.2 敏感性分析

为了明确不同参数对临界流速的影响程度以及和室内实验的定性结果相比较,对公式(14)进行敏感性分析,其中  $\gamma_s=20 \text{ kN/m}^3$ ,  $\gamma_w=9 \text{ kN/m}^3$ ,  $\alpha=0.5$ 。

由图6和图7可以看出: $d_p$ 越大,临界流速越大,这是因为砂粒颗粒大,自身惯性大,所以与小颗粒相比不易启动; $\varphi$ 越大,临界流速越大,这是因为当 $\varphi$ 增大时,地层中的孔道变大变多,在表观速度相同时,流体的真实速度变小,因此水动力作用减小,所以砂粒不容易启动; $\mu$ 越大,水动力越强,因此随着黏度的增大,临界流速减小; $\theta$ 越大,岩石砂粒之间的摩擦力越大,需要克服的阻力越大,因此须增大的水动力相应临界流速就越大。

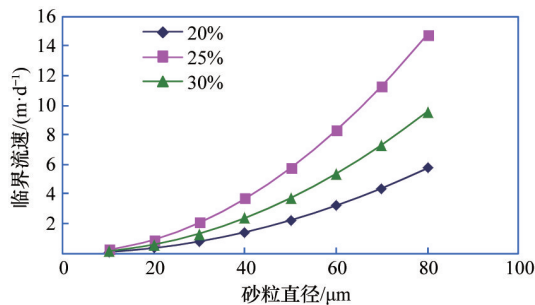


图6 不同孔隙度下砂粒直径和临界流速关系曲线 ( $\mu=1 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ ,  $\theta=10^\circ$ )

Fig. 6 Sandstone particle and critical velocity curves at different  $\varphi$  ( $\mu=1 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ ,  $\theta=10^\circ$ )

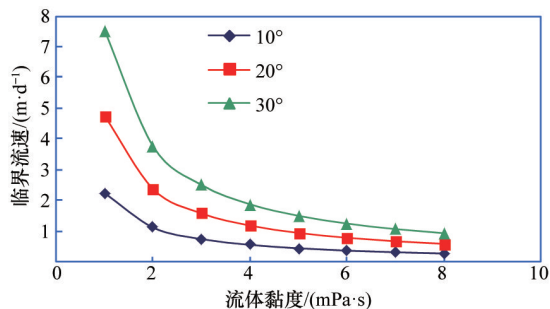


图7 不同摩擦角下流体黏度和临界流速关系曲线 ( $d_p=20 \mu\text{m}$ ,  $\varphi=0.2$ )

Fig. 7 Viscosity and critical velocity curves at different  $\theta$  ( $d_p=20 \mu\text{m}$ ,  $\varphi=0.2$ )

### 3 实例应用

文献[14]对临盘油田盘二块沙三下出砂规律进行了实验研究,实验数据如表1<sup>[4]</sup>所示。

表1 砂岩出砂规律实验研究

Table 1 Experimental study of sandstone production

岩心号	空气渗透率/ ( $10^{-3}\mu\text{m}^2$ )	孔隙度/ %	临界流速/ ( $\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$ )
P2-207-4	1009	33.42	2.935
P2-245-4	357	28.84	1.761
P2-X591-4	548	29.63	1.467

疏松砂岩颗粒指标取同一套参数: $\gamma_s=26.46 \text{ kN/m}^3$ ,  $\gamma_w=9.8 \text{ kN/m}^3$ ,  $d_p=20 \mu\text{m}$ ,  $\mu=1.01 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ , 设 $\alpha=0.5$ ,  $\theta=15^\circ$ , 计算结果如表2所示。计算的3块岩心平均相对误差为15.9%,其中P2-X591-4岩心计算误差较大,主要误差可能是由于岩心本身的复杂性和公式计算采用砂岩颗粒指标为同一套参数计算造成。

表2 临界流速计算结果与实验结果对比

Table 2 Comparison of calculation results and experimental results

岩心号	临界流速/( $\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$ )		相对误差/%	平均误差/%
	实验	计算		
P2-207-4	2.935	2.83	3.5	
P2-245-4	1.761	1.94	10.1	15.9
P2-X591-4	1.467	1.98	34.9	

### 4 结论

1) 从颗粒尺度上分析了砂岩出砂的力学条件,提出了砂岩出砂的3个几何约束条件,认为地层出砂不仅要满足一定的力学条件,还需要满足一定的几何条件,只有当几何约束条件和力学约束条件同时满足时,地层才有出砂的可能。

2) 建立了砂岩出砂毛管束模型,结合水力条件和砂岩颗粒应力特征,推导出疏松砂岩出砂的临界流速公式。敏感性分析表明,随着砂粒直径、孔隙度和岩石颗粒摩擦角的增大,临界流速增大,随着流体黏度的增大,临界流速变小。实例验证表明,推导的临界流速公式和实验结果符合较好。

3) 砂岩出砂严重时,渗流通道变大,流动速度加快,将形成湍流流动,毛管束模型中的层流假设就不能满足实际情况,需要进一步研究湍流毛管束模型。疏松砂岩实验研究表明,流速波动影响出砂,需开展相关方面的定量表征。

### 参考文献(References)

[1] 卢宝荣,蔡明俊,刘树明,等. 羊三木油田馆一油组油层出砂影响因素探讨[J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(3): 146-147.  
Lu Baorong, Cai Mingjun, Liu Shuming, et al. Influencing factors of reservoir sand flow in the Guan No. 1 oil group, Yangsanmu Oilfield[J].

- Petroleum Exploration and Development, 2004, 31(3): 146-147.
- [2] 张本艳, 张继超, 涂文利. 胜利油田注水现状及对储集层的影响[J]. 石油勘探与开发, 2007, 34(3): 364-368.  
Zhang Benyan, Zhang Jichao, Tu Wenli. Current situation of water injection and its influence on reservoirs in Shengli Oilfield[J]. Petroleum Exploration and Development, 2007, 34(3): 364-368.
- [3] 汪永利, 张保平. Fula 油田稠油藏地层出砂机理实验研究[J]. 石油勘探与开发, 2002, 29(4): 109-110.  
Wang Yongli, Zhang Baoping. A laboratory research for the sand-production mechanism of viscous oil reservoirs in Fula Oilfield[J]. Petroleum Exploration and Development, 2002, 29(4): 109-110.
- [4] Essam I. Effect of water injection on sand production associated with oil production in sandstone reservoirs[C]//SPE/IADC Middle East Drilling and Technology Conference 2007. Cairo, Egypt: Society of Petroleum Engineers Inc, 2007: 1-9.
- [5] Zhang L W, Dusseault M B. Sand-production simulation in heavy-oil reservoirs[J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 2004, 7(6): 399-407.
- [6] 王利华, 邓金根, 周建良, 等. 弱固结砂岩气藏出砂物理模拟实验[J]. 石油学报, 2011, 32(6): 1007-1011.  
Wang Lihua, Deng Jingen, Zhou Jianliang, et al. A physical simulation experiment on sanding in weakly consolidated sandstone gas reservoirs [J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(6): 1007-1011.
- [7] 曾祥林, 何冠军, 孙福街, 等. SZ36-1 油藏出砂对渗透率影响及出砂规律实验模拟[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(6): 105-107.  
Zeng Xianglin, He Guanjun, Sun Fujie, et al. Influences of sand production on permeability and experiments on sand production characters in SZ36-1 Oilfield[J]. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(6): 105-107.
- [8] 刘建军, 裴桂红, 李继祥, 等. 弱胶结油藏大孔道出砂的渗流与管流耦合模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 32(S2): 4726-4730.  
Liu Jianjun, Pei Guihong, Li Jixiang, et al. Coupled model of seepage and pipe-flow for sand production from big channel in unconsolidated reservoir[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 32(S2): 4726-4730.
- [9] Boutt D F, Cook B K, Williams J R. A coupled fluid-solid model for problems in geomechanics: Application to sand production[J]. International Journal for Numerical and Analytical in Geomechanics, 2011, 35: 997-1018.
- [10] 薛世峰, 马国顺, 于来刚, 等. 流固耦合模型在定量预测油水井出砂过程中的应用[J]. 石油勘探与开发, 2007, 34(8): 750-754.  
Xue Shifeng, Ma Guoshun, Yu Laigang, et al. A fluid-solid coupling model and its application in quantitative sand production prediction of oil and water wells[J]. Petroleum Exploration and Development, 2007, 34(8): 750-754.
- [11] Wang Y L. Coupled reservoir-geomechanics model with sand erosion for sand rate and enhanced production prediction[C]//The SPE International Symposium and Exhibition on Formation Damage Control 2002. Lafayette, USA: Society of Petroleum Engineers Inc, 2002: 1-11.
- [12] 万志清, 秦四清, 李志刚, 等. 土洞形成的机理及起始条件[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(8): 1377-1382.  
Wan Zhiqing, Qin Siqing, Li Zhigang, et al. Formation mechanism and initial condition of soil cavity[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(8): 1377-1382.
- [13] 李宾元. 油层出砂机理研究[J]. 西南石油学院学报, 1994, 16(1): 23-27.  
Li Binyuan. Study of mechanism of oil reservoir sand production[J]. Journal of Southwestern Petroleum Institute, 1994, 16(1): 23-27.
- [14] 王新东, 凌明友, 李三起, 等. 临盘油田盘二块沙三下出砂规律试验研究[J]. 断块油气田, 2003, 10(3): 67-70.  
Wang Xindong, Ling Mingyou, Li Sanqi, et al. Experimental study of sand producing law of lower S3, Pan'er Area in Linpan Oilfield[J]. Fault-block Oil & Gas Field, 2003, 10(3): 67-70.

(责任编辑 赵业玲)

·学术动态·



## 中国首席信息官联盟成立

2013年12月15日,由中国电子学会、电子工业出版社、中国人民大学发起成立的中国首席信息官联盟在北京成立。

中国首席信息官联盟旨在贯彻落实《工业和信息化部关于印发信息化和工业化深度融合专项行动计划(2013—2018年)的通知》要在大中型企业全面普及首席信息官制度的精神。联盟作为行业协调促进组织,由相关单位和个人作为联盟会员自愿参与活动,是一个依照联盟章程和会员愿望,针对行业热点问题定期进行交流研讨的开放式、非营利的全国组织。

详见中国科协网 <http://www.cast.org.cn/n35081/n35548/n38620/15285068.html>。