

# 稠油出砂冷采模型研究现状

潘一<sup>1,2</sup>, 肖立志<sup>1</sup>

1. 中国石油大学(北京)地球物理与信息工程学院, 北京 102249

2. 辽宁石油化工大学石油天然气工程学院, 辽宁抚顺 113001

**摘要** 通过对稠油出砂冷采的适用条件和机理的描述,引出了建立的有关稠油出砂冷采的数学模型介绍,主要涵盖工程法出砂模型、连续法中的水动力模型和耦合地质力学水动力学侵蚀模型、不连续法模型以及泡沫油模型。对于每一类型模型又给出研究人员针对不同因素采用不同方法建立的数学模型,并对这些模型做了评价和比较。针对稠油出砂冷采机理的复杂性,建议今后的模型应该逐渐加入更多的影响因素,以建立一个更完善的、更加接近生产实际的模型。最后,对于稠油出砂冷采技术的应用前景及后续开发技术,提出了部分见解。

**关键词** 稠油出砂冷采; 蚯蚓洞; 泡沫油; 模型

**中图分类号** TE3

**文献标识码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.13.012

## Status quo of Modeling Research on Cold Heavy Oil Production with Sand

PAN Yi<sup>1,2</sup>, XIAO Lizhi<sup>1</sup>

1. College of Geophysics and Information Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

2. College of Petroleum Engineering, Liaoning Shihua University, Fushun 113001, Liaoning Province, China

**Abstract** Heavy oil is the most important resource and the way to replenish the loss of oil in the 21st century. Cold Heavy Oil Production with Sand (CHOPS) is an effective and important method to exploit heavy oil reservoir with the low cost. By describing the applicable condition and mechanism of CHOPS, the introduction of establishment about the mathematical model of CHOPS is educed; it mainly includes engineering method sand production model, continuous method of hydrodynamic model, water dynamics erosion model coupling geological mechanics, discontinuous method model, and foamy oil model. For each type of model, it gives researchers different methods to establish the mathematical model according to different factors, at the same time the models have been evaluated and compared with each other. Due to the complexity of the mechanism of CHOPS, in order to form a model which is more perfect and more close to the actual production, more influence factors should be gradually added in the future. Finally, for the application prospect and subsequent development technology of CHOPS, some own viewpoints are presented for the discussion.

**Keywords** cold heavy oil production with sand; wormhole; foamy oil; modeling

### 0 引言

重油资源已经成为 21 世纪世界重要的能源资源。据国际能源局统计,全球稠油储量达到了 6 万亿桶<sup>[1]</sup>。稠油出砂冷采(Cold Heavy Oil Production with Sand, CHOPS)是重油生产的重要方法之一。其优点是投资少,操作成本低,产油率高,而且十分适合于开采无边底水的较薄储层。作为一种非加热一次采油方式,稠油出砂冷采在稠油储集层中允许出砂,并依靠强力射孔技术和设计精良的螺杆泵系统采油。

早在 20 世纪 80 年代中期,随着国际油价的下跌,稠油注蒸汽开采等方法面临着经济上的严重挑战。为了降低采油成本,提高稠油开采的经济效益,20 世纪 80 年代末—90 年代初,加拿大的一些小石油公司率先使用了稠油出砂冷采技术。其主要作法是,不注蒸汽,也不采取防砂措施,射孔后直接应用螺杆泵进行开采。实践表明,稠油冷采井的产量是蒸汽吞吐井的 4—10 倍,开采成本比蒸汽吞吐降低 40%左右。90 年代中期,稠油出砂冷采技术已成为热点,除众多小石油

收稿日期:2012-03-02;修回日期:2012-04-16

作者简介:潘一,博士,研究方向为油藏开发,电子信箱:panyi\_bj@126.com

公司外,一些大石油公司也纷纷涉及这一领域。

经过 20 多年的发展,这项技术尤其是开采工艺已相当成熟。稠油出砂冷采已显示出良好的经济效益,采收率达到 8%—20%,日产量 20—300 桶/d,原油操作费用 2—4 加元(合 12—25 元人民币)/桶<sup>[2]</sup>,采油成本远远低于蒸汽吞吐等开采方式。

因此,对稠油出砂冷采技术进行相关的开采工艺研究,具有重要的战略意义;针对稠油开发利用存在投资大、风险高、设施配套不完善等问题,进行稠油出砂冷采技术相关的数值模拟模型研究,具有重要的现实意义<sup>[3]</sup>。

## 1 稠油出砂冷采的适用条件

目前,稠油出砂冷采技术对于原油的黏度、油层的厚度和油藏的压力并没有特定的要求,只要满足油藏埋深小于螺杆泵的扬程即可,因此其所适用的油藏范围较广<sup>[4]</sup>。总的来说,稠油出砂冷采技术比较适合油层胶结疏松、地层原油中含有一定溶解气,距边、底水较远的稠油藏。

相对于储层来说,对出砂冷采的效果影响最大的因素是储层胶结程度和粒度大小。适宜出砂冷采的储层为疏松储层或半胶结储层,一般无钙质胶结物且泥质含量低于 20%即可,若低于 10%更佳。通过对大量生产数据的统计分析表明,粒径小于 2mm,埋藏深度在 300—800m 之间,地层压力为 2.4—6.0MPa 的砂岩油藏是应用稠油出砂冷采技术的理想油藏。除此之外,由于储层厚度在一定程度上影响着蚯蚓洞的发育状况和油井的产能,因此对出砂冷采的效果也有一定的影响。根据经验,适合稠油出砂冷采的储层厚度以大于 3m 为宜,大于 5m 更佳。但如果储层物性条件比较好或地层原油黏度较低,储层厚度的限制可以适当放宽。

通常,原油黏度与其携砂能力和形成泡沫油的稳定性成正比关系。即原油黏度越大,其携砂能力越强,形成的泡沫油稳定性越好。然而,当原油黏度超出一定界限时,其流动性能的下降会影响到稠油出砂冷采技术的实施。研究表明,当原油黏度低于 500mPa·s 时,原油的携砂能力降低,形成泡沫油稳定性差且持续时间短,不足以支持稠油出砂冷采。因此适合该技术的黏度范围为 600—160000mPa·s,以 2000—50000mPa·s 为佳。

## 2 稠油出砂冷采机理

大量的研究表明,稠油出砂冷采之所以能保持长期高产的主要机理,一是出砂形成蚯蚓洞网络,二是稳定的泡沫油流动<sup>[5]</sup>。

油藏出砂来源主要有自由砂和骨架砂。其出砂机理为:开采过程中,应力集中引起储层岩石软化(岩石强度降低)产生松散颗粒;孔隙流体流动对岩石颗粒的冲蚀;孔隙度变化作为流固耦合的基本参数,造成岩石强度的连续损伤;孔隙度变化及颗粒随流体的流动,影响储层水动力学特性<sup>[6]</sup>。储层

大量出砂后,在储集层内高孔隙度区域内沿射孔孔道末端形成蚯蚓洞,并沿相对网络形成后,储层孔隙度最高可达到 50%以上,渗透率可以提高几十倍。这相当于有大量水平井和分支脆弱带向外延伸。经流化带、屈服带和破坏带呈树枝状逐渐向外延伸,形成蚯蚓洞网络。蚯蚓洞水平井向油井供液,极大地提高稠油在储层的流动能力。

出砂冷采井中的稠油通常都溶解一定量的天然气。当对油井进行强采时,天然气将从原油中析出,但是这些气体不会马上聚集形成连续的气相,而是在向井筒流动的过程中以气泡的形式存在。生产时,只要油藏压力大于泡点压力,产出的是单相油。如果油藏压力低于泡点压力,就会形成一种泡沫相。如果井底压力或井底压力梯度低于泡点压力时,气体就从泡沫相中分离出来。这样,就变成了两相流,致使泡沫油相流动性变差,原油产量降低。显然,如果随流动压力梯度而变的残留于油中的气体体积增加的话,那么,在开采的大多数时间内,井眼附近地带泡沫流将占优势,这样就提高了产量和采收率。

## 3 模型研究现状

### 3.1 出砂模型

#### 3.1.1 工程方法

出砂情况最初被描述正是基于工程方法。这些方法依赖于建立在出砂井数据和油田参数的相关性上。Ghalambor 等<sup>[7]</sup>为了评估消耗和出水的影响,记录了跨越很大周期的宝贵出砂数据。随着大量的参数测量,油田出砂数据和操作参数在准确性上有所增加,然而更大量的数据和油田特性的需求也因此而增加。Somerville 等<sup>[8]</sup>在 1994 年提出了在屈服带的经验性岩屑生成判别式。该判别式是基于崩落带尺寸估算水位降深的函数,不过该研究只限于生成砂岩碎屑。Kanj 和 Roegiers<sup>[9]</sup>在 1998 年开发了一种人工神经网络系统来预报和防止出砂。然而该人工神经网络在任何油田使用前,都必须正确地训练(如历史拟合)和有效地测试。Yuan 等<sup>[10]</sup>都提出了基于随机行走和破裂网络的数学模型,用于建立蚯蚓洞分支的模型。显然这些模型缺少物理描述,例如质量守恒、动量守恒和砂岩骨架强度等。2003 年, Liu 和 Zhao<sup>[11]</sup>根据 Witten 和 Sander<sup>[12]</sup>1983 年提出的在蚯蚓洞可能的结构模型,提出了 DLA(扩散有限集合)模型。然而,这个模型是一个纯粹的基于集合过程的数学表示。这和实际上由于侵蚀引起出砂物理性质是矛盾的,侵蚀需要解集而不是聚集。而且,油藏物理性质,例如储层强度、水平压力和流体性质等都没有被描述。

#### 3.1.2 连续法

1973 年,Whitaker<sup>[13]</sup>提出连续法,该方法承认相的不连续性,但假设不同相是连续的,用一种被称为混合物原理均质化的数学技巧,来达到一种等价的连续性。所有孔隙内介质组分在区域内的各点上占用同一时间,而组分体积薄片被认为是不连续分布的。连续模型不仅限于压力分析,也包括如

多相流、相饱和度和相对渗透率等油藏模拟概念的确立。

出砂是地质力学和流体动力学引起的。由于压力集中造成的较大应变导致了局部损伤,局部损伤使得那些可以离开骨架进入到可流动粒子群里的松散砂粒的数量大幅增加。另一方面,粒子被流体从骨架基质上冲刷掉,提高了孔隙度,也可以引起粒间压力再调整,进一步导致砂岩骨架的强度降低,损伤加重。机械方面考虑了弹塑性、黏塑性、分叉系统和损伤理论。流体力学方面考虑了内部和表面侵蚀现象<sup>[14]</sup>和拉伸破坏<sup>[15]</sup>。

### 3.1.2.1 水动力学侵蚀模型

在水动力学方面的工作已经非常出色了。例如,1996年 Vardoulakis 等<sup>[14]</sup>首次分析了水动力学框架下的出砂问题。在这个框架下,砂粒由于收到水动力的拖拽而脱离岩石骨架,这与侵蚀问题很相像。早在 1937 年,Einstein<sup>[16]</sup>提出了孔隙介质非胶体固体颗粒过滤理论。基于这一理论和现象学,Vardoulakis 等<sup>[14]</sup>在 1996 年提出了简单成分法则,描述了由于液化砂混合物排出引起的粒子侵蚀驱动。据 Stavropoulou 等<sup>[17]</sup>1998 年的研究报告中所述,其关于砂粒运移的水动力侵蚀模型已经应用于描述井眼稳定性问题,并显示出该模型在解决这方面问题的潜力。不过,显然这些模型没有考虑机械形变,而这正是引起最初砂岩崩落和砂粒移动的关键。

### 3.1.2.2 耦合地质力学水动力学侵蚀模型

Vardoulakis 等<sup>[14]</sup>在 1996 年所做的关于井眼稳定性的工作,已经扩展到分析了地质力学中的弹塑性应力应变问题。Papamichos 等<sup>[18]</sup>2001 年在实验室观察到出砂的性质,在此基础上提出了一种机械侵蚀模型。模拟结果与实验数据的对比表明,要想得到现实的出砂预测,必须广泛地耦合孔隙机械力学和侵蚀过程。研究发现,在出砂造成的空腔周围的物质被侵蚀,并在被相关的具有较弱水动力的流体带走之前,其机械性质已经被作用其上的应力破坏。Tronvoll 等<sup>[19]</sup>在 1997 年的疏松砂岩出砂实验也证实了这一现象。一旦空腔内的物质被移动,则出砂过程可能导致新暴露的物质的破坏和侵蚀。而且在模型中,侵蚀削弱了物质,也引起压力从较弱区域到远离空腔的较强区域的重新分配。这可以由模型侵蚀部分的塑性依赖出砂系数和机械部分孔隙依赖内聚力系数得到。实现结果表明,在疏松和压实砂岩中,出砂是与洞内可被流体流水动力移动区域的内聚力降低和塑性化紧密关联的。Wan 和 Wang<sup>[20-22]</sup>于 2002—2004 年的工作也再次证实了以上现象。而且为了能够真实表述初始边界值问题,而不是小尺寸的实验设置,例如油井初始边界,他们尝试开发了一种耦合的侵蚀——地质力学模型。2011 年,王伯军等<sup>[23]</sup>建立了考虑流固耦合的颗粒离散元稠油出砂冷采数学模型,从微观角度定量描述出砂机理。该模型模拟产砂速率、产油速率及井底压力结果与一维物理模型实验实测值均吻合较好,验证了模型的正确性和可靠性,为研究稠油出砂冷采提供了一种新手段。

### 3.1.2.3 其他模型

出砂开始模型用一个具有相似油井稳定性的方式处理出砂预测问题,模型只表述了出砂的开始。Geilikman 等<sup>[24]</sup>在 1994 年提出了一种黏塑性颗粒流模型。该模型不仅考虑了岩砂岩骨架的不稳定性,而且考虑了能够使出砂持续的井眼周围的颗粒繁殖生长区域的动态性质,以及其质量的运移性质。为了分析上的方便,对该模型做了一些简化,因此该模型有一定的局限性,不能应用于真实初始边界值问题。Hoek 等<sup>[25]</sup>在 2000 年提出了一个理论出砂预测模型,该模型基于组分分枝理论。Vardoulakis 在 1989 年和 1995 年,Borst 等在 1997 年,Dyskin 和 Galybin 在 2001 年,都在研究这种持续分枝理论<sup>[26-29]</sup>。

### 3.1.3 不连续法

正如上面提到的,出砂是个动态的过程,这已经被实际观测所证实。离散砂粒是对从骨架脱离的独立砂粒的最好描述。粒子和作用力的多重相互作用动态连续拓扑结构,常被用来描述离散单元的形成过程。固液耦合法是对于离散单元模拟出砂的成熟方法。然而,由于离散单元方法包括了固有的大量计算程序,使得目前的软件在模拟即使数量不多的粒子在二维或三维空间内的变化时,仍然要消耗大量计算时间。考虑含有离散粒子的流体相及其相互作用,成为使用离散单元方法发出砂模型的主要绊脚石。其他方法包括 Cundall 在 1971 年提出的离散单元方法<sup>[30]</sup>。另外,O'Connor 等<sup>[31]</sup>,Preece 等<sup>[32]</sup>和 Jensen 等<sup>[33]</sup>,都在提高采收率方面尝试将离散单元方法应用于模拟出砂机械力学。

### 3.2 泡沫油模型

在泡沫溶解气驱机理研究进展的同时,也提出了一些泡沫油流模型,每个模型都有其特别强调的方面。

Sheng 等<sup>[34-35]</sup>分别在 1996 年和 1999 年提出了建立在多相理论上的模型。该模型在遵守守恒定律的前提下,溶解气可转换成分散气,分散气可转换成游离气。尽管理论阐述已经非常详细,但结果似乎并没有后续实验的趋势。其他发表的模型包括 Kraus 等<sup>[36]</sup>1993 年提出的为泡点模型,Lebel<sup>[37]</sup>在 1994 年提出的改进分流模型,以及 Claridge<sup>[38]</sup>在 1995 年提出的降低原油黏度模型。Maini<sup>[39]</sup>在 1996 年对部分模型进行详尽的回顾和讨论。实际上这些模型已被用于重油生产中的历史拟合,但它们普遍的弱点是不能真实地包含最具泡沫油流重要特征的动态过程。虽然使用这些模型可能获得一个可以接受的历史匹配,但预测能力是有限的。Sheng 等<sup>[40]</sup>于 1999 年提出了比较成功的建模方法,即气泡成核、生长和脱离原油的模型。该模型允许通过调节 2 个不确定的参数,寻找比预测模型更适合实验数据理论的参数。Mastmann 等<sup>[41]</sup>用 Eclipse 黑油模拟器,预测了泡沫油性质。使用这个模拟器的模型方程式本质上是基于相对渗透率概念的常规多项方程。由于在油和气的同相混合物中,气体分子黏度已经不重要了,因此相对渗透率不适合用来说明油气相同混合物。



Joseph 等<sup>[42-43]</sup>于 2002 年和 2003 年提出的模型不需要详细的气泡成核、生长、压缩性或产生相对速度力的信息。他们提出了单一相或混合物理论,该理论认为分散气体是以气体馏分形式,存在于单一流体中,而该流体的黏度、密度和达西流均取决于其所含的气体馏分。他们推导出一个关于泡沫油的状态方程,叫做均衡等温线。来自溶解气残留的气体被释放扩散,在一定温度和压力条件下达到平衡状态,该方程能够推导出此时分散气体的体积馏分。而且,这种推导可以由 PVT 数据得到。在生产压差下,系统恢复到平衡态所需的时间可以用 2 个非线性速率法则描述。该法则可以用 2 个经验驰豫时间表征,驰豫方程描述。合并方程系统可以简化成一对耦合的,关于分散气体馏分和压力差的非线性偏微分方程,进一步可以简化成平衡状态下的关于压力差的二阶精度方程。把 Galerkin 有限元方法应用于合并后的偏微分方程可以得到较好的解。然而,他们没有考虑重油油藏中由于出砂引起的孔隙度变化。

Aroar 等<sup>[44]</sup>在 2003 年,开发了气泡群平衡模型来描述气泡成核和生长的过程。他们合并表述溶解气驱的瞬时成核(IN)机理和连续成核(PN)机理,可以推导出适当的速率方程。PN 模型可以很好地匹配轻油和重油的实验数据,且优于 IN 模型的实验。而且,提出的群平衡方程类似于油藏模拟的质量守恒方程,所以能够与现行油藏模拟框架合并。

2009 年,李剑等<sup>[45]</sup>为了准确模拟泡沫油流在储层内的流动规律,从渗流力学基本方程出发,推导出泡沫油流渗流基本方程,并利用有限差分方法求得数值解。将计算结果与黑油模型以及室内实验进行对比,结果表明,所提出的模型更接近实验结果。2011 年,赵瑞东等<sup>[46]</sup>建立并求解了在水动力和扩散力综合作用下稠油油相中单气泡生长的数学模型,描述了稠油和稀油中所表现出的不同气泡生长现象,解释了产生稳定泡沫油现象的原因。

## 4 展望

### 4.1 稠油出砂冷采模型发展方向

综上所述,现有稠油出砂冷采模型,涵盖了分别描述蚯蚓洞生长机理或泡沫油流机理的模型,以及联合泡沫油流和蚯蚓洞网络生长的模型,更有基于上述模型的优化模型。这些模型中,多数模型更关心如何描述蚯蚓洞和泡沫油流生成,而不是蚯蚓洞和泡沫油流对稠油出砂冷采性能的影响。虽然蚯蚓洞、泡沫油流的性质及其对冷采性能影响是冷采技术的关键,但在这方面也存在很多未知的地方。因此进一步的研究工作需要更多的考虑影响冷采性能的因素,主要包括储层属性、流体属性等。如图 1 所示,稠油出砂冷采机理复杂,影响因素众多,因此要建立一个更完善的、囊括更全面的影响因素,以更加接近生产实际的模型,这仍然需要做大量的工作。

### 4.2 稠油出砂冷采技术的应用前景

稠油出砂冷采作为一种新兴技术在许多方面还需要进

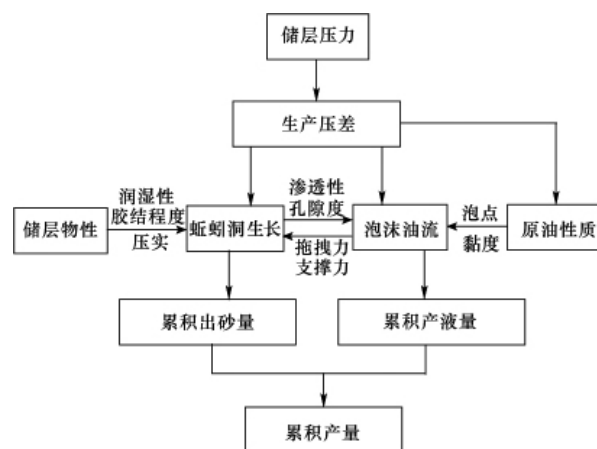


图 1 蚯蚓洞生长与泡沫油流的关系

Fig. 1 Relationship between wormhole growth and foamy oil flow

一步研究和完善。由于油出砂冷采中砂与油同时采出,因此大多采用螺杆泵的举升方式,以有效采出油砂并降低泵的磨损。为此,螺杆泵技术的优化与发展将对稠油出砂冷采技术的应用产生巨大影响。目前来看,随着电潜螺杆泵携砂能力的不断提高,性能的不断改进,将会越来越多的取代普通螺杆泵。

大量出砂虽然会大大提高渗透率,但是有时也适得其反,造成螺杆泵的严重损失和储层的永久伤害。因此,有些学者提出了有限排砂的概念,以求既能最大限度的保护产能,又能挡住一定粒度砂产出导致的危害。

另外,稠油出砂冷采采收率一般只有 8%—15%,最高不超过 20%,也就是说冷采之后仍有 80%以上的资源没被采出,其后续开采方式还需进一步探讨。出砂和地层坍塌会改变渗透率,影响后续热采或非热采方式的选择,这些都是需要研究的问题。为进一步经济有效的开采稠油资源,一些研究机构提出了一些可能会采取的冷采后续开采方法,包括电磁加热以及溶解剂驱替(VAPEX)<sup>[46]</sup>、蒸汽辅助重力驱、蒸汽吞吐、蒸汽驱等以及它们的联合应用,但其应用效果还有待实践的检验。

冷采后续开采方法的研究,如果采用实际生产逐一验证的话,势必造成不必要的浪费。为此,使用数学模拟的方法,在稠油出砂冷采模型获得的结果之上,应用其他后续开采方法的模型,继续对相应储层进行模拟,已找到更适合的后续开采方法,才是最为经济合理的方法。这也进一步说明,目前对稠油出砂冷采技术研究的重中之重就是建立一个更准确、更贴近生产实际的数学模型。

## 参考文献 (References)

- [1] Clark B. Heavy oil, extra-heavy oil and bitumen unconventional oil [R]. 2007, [http://www.npc.org/study\\_topic\\_papers/22-ttg-heavy-oil.pdf](http://www.npc.org/study_topic_papers/22-ttg-heavy-oil.pdf).
- [2] Dusseault M. Cold heavy oil production with sand in the Canadian heavy oil industry [R]. Report prepared for alberta department of energy. 2004. [http://www.energy.gov.ab.ca/OilSands/pdfs/RPT\\_Chops\\_chptr1.pdf](http://www.energy.gov.ab.ca/OilSands/pdfs/RPT_Chops_chptr1.pdf).

- [3] 潘一, 肖立志. 稠油出砂冷采数学模型研究 [J]. 科技导报, 2011, 29(16): 54–57.  
Pan Yi, Xiao Lizhi. *Science & Technology Review*, 2011, 29(16): 54–57.
- [4] 邝煜, 焦志豪, 史进, 等. 稠油出砂冷采技术及展望 [J]. 内蒙古石油化工, 2011(6): 102–104.  
Kuang Yu, Jiao Zhihao, Shi Jin, *et al.* *Inner Mongolia Petrochemical Industry*, 2011(6): 102–104.
- [5] 汪绪刚, 邹洪岚, 李国诚, 等. 苏丹 6 区稠油有限携砂冷采数值模拟及采油工艺技术[J]. 辽宁工程技术大学学报: 自然科学版, 2009, 28(增刊): 131–134.  
Wang Xugang, Zou Honglan, Li Guocheng, *et al.* *Journal of Liaoning Technical University: Natural Science Edition*, 2009, 28(S): 131–134.
- [6] Pan Y, Chen Z, Sun J, *et al.* Research progress of modelling on cold heavy oil production with sand [C]. SPE Western Regional Meeting, 27–29 May 2010, Anaheim, California, USA.
- [7] Ghalambor A, Hayatdavourdi A, Alcocer C F, *et al.* Predicting sand production in US gulf coast gas wells producing free water [J]. *Journal of Petroleum Technology*, 1989, 41(12): 1336–1343.
- [8] Somerville J M, Sarnt B G D, Zoller S L, *et al.* The potential for sand production: Assessment by finite element modeling [C]. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, Louisiana, USA, 1994.
- [9] Kanj M, Roegiers J C. A neural approach to sand production prediction in wells [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1998, 35(4–5): 489.
- [10] Yuan J Y, Tremblay B, Babchin A. A wormhole network model of cold production in heavy oil [C]. International Thermal Operations/Heavy Oil Symposium, Bakersfield, California, Society of Petroleum Engineers, 1999.
- [11] Liu X, Zhao G. A fractal wormhole model for cold heavy oil production [C]. Petroleum Society's Canadian International Petroleum Conference 2003, Calgary, AB, Canada, 2003, 10.
- [12] Witten T A, Sander L M. Diffusion-limited aggregation [J]. *Physical Review B: Condensed Matter*, 1983, 27(9): 5686–5697.
- [13] Whitaker S. The transport equations for multi-phase system [J]. *Chemical Engineering Science*, 1973, 28(1): 139–147.
- [14] Vardoulakis I, Stavropoulou M, Papanastasiou P. Hydro-mechanical aspects of the sand production problem [J]. *Transport in Porous Media*, 1996, 22(2): 225–244.
- [15] Morita N, Whitfill D L, Massie I, *et al.* Realistic sand-production prediction: Numerical approach [J]. *SPE Production Engineering*, 1989, 4(1): 15–24.
- [16] Einstein H A. Der geschlebetrieb als wahrscheinlichkeitsproblem [M]., Zurich: Rascher, 1937.
- [17] Stavropoulou M, Papanastasiou P, Vardoulakis I. Coupled wellbore erosion and stability analysis [J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 1998, 22(9): 749–769.
- [18] Papamichos E, Vardoulakis I, Tronvoll J, *et al.* Volumetric sand production model and experiment [J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2001, 25(8): 789–808.
- [19] Tronvoll J, Skjerstein A, Papamichos E. Sand production: Mechanical failure or hydrodynamic erosion [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1997, 34(3–4): 291.e1–291.e17.
- [20] Wan R G, Wang J. Modeling sand production within a continuum mechanics framework [J]. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 2002, 41(4): 46–52.
- [21] Wan R G, Wang J. Modeling sand production and erosion growth under combined axial and radial flow [C]. SPE International Thermal Operations and Heavy Oil Symposium and International Horizontal Well Technology Conference, 4–7 November 2002, Calgary, Alberta, Canada.
- [22] Wan R G, Wang J. Modeling of sand production and wormhole propagation in an oil saturated sand pack using stabilized finite element methods [J]. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 2004, 43(4): 45–52.
- [23] 王伯军, 张霞, 马德胜, 等. 稠油出砂冷采颗粒离散元数学模型 [J]. 石油勘探与开发, 2011, 38(4): 469–473.  
Wang Bojun, Zhang Xia, Ma Desheng, *et al.* *Petroleum Exploration and Development*, 2011, 38(4): 469–473.
- [24] Geilikman M B, Dusseault M B, Dullien F A L. Fluid-saturated solid flow with propagation of a yielding front [J]. *Rock Mechanics in Petroleum Engineering*, 1994, 29(31): 329–337.
- [25] Hoek P J V D, Hertogh G M M, Kooijrn A P, *et al.* A new concept of sand production prediction: Theory and laboratory experiments [J]. *SPE Drill and Completion*, 2000, 15(4): 261–273.
- [26] Vardoulakis I. Shear-banding and liquefaction in granular materials on the basis of a cosserat continuum theory [J]. *Archive of Applied Mechanics*, 1989, 59(2): 106–113.
- [27] Vardoulakis I, Sulem J. Bifurcation analysis in geomechanics [M]. Blackie Academic and Professional, ISBN 0–7514–0214–1, Glasgow, 1995.
- [28] Borst R De, Groen A E, Van der Veen H. Numerical modeling of bifurcation and postbifurcation in soils [C]. Balkema, Rotterdam, 1997.
- [29] Dyskin A V, Galybin A N. Bifurcation in periodic arrays of growing cracks 2-d analytical solutions [C]//5th International Workshop on Bifurcation and Localization Theory in Geomechanics, The Netherlands: A A Balkema. 2001: 481–486.
- [30] Cundall P A. A computer model for simulating progressive, large-scale movements in block rock systems [C]//Proceedings of The International Symposium on Rock Mechanics, Nancy, France, 1971.
- [31] O'Connor R M, Torczynski J R, Preece D S, *et al.* Discrete element modeling of sand production [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 1997, 34(231): 3–4.
- [32] Preece D S, Jensen R P, Perkins E D, *et al.* Sand production modelling using superquadric discrete elements and coupling of fluid flow and particle motion [C]. US Rock Mechanics Symposium (Vail Rocks), Amsterdam, Balkema, 1999.
- [33] Jensen R P, Preece D S, Cook B K, *et al.* Modeling sand production with darcy-flow coupled with discrete elements [C]//Proceedings of the 10th International Conference on Computer Methods and Advances in Geo-mechanics, Desai, EeL Tucson, Arizona, 2001: 819–822.
- [34] Sheng J J, Hayes R E, Maini B B. A dynamic model to simulate foamy oil flow in porous media [C]. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Denver, Colorado, 6–9 October 1996: 1–13.
- [35] Sheng J J, Hayes R E, Maini B B, *et al.* Modeling foamy oil flow in porous media [J]. *Transport in Porous Media*, 1999, 35(2): 227–258.
- [36] Kraus W P, McCaffrey W J, Boyd G W. Pseudo-bubble point model for foamy oils [C]. The 44th Annual Technical Meeting, Calgary, AB, Canada, May 9–12, 1993.
- [37] Lebel J P. Performance implications of various reservoir access geometries [C]. The 11th Annual Heavy Oil and Oil Sands Technical Symposium, Calgary, AB, Canada, March 2, 1994.
- [38] Claridge E L. A proposed model and mechanism for anomalous foamy

- heavy oil behavior[C]. Society of Petroleum Engineers, 1994.
- [39] Maini B B. Foamy oil flow in heavy oil production[J]. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 1996, 35(9): 21-24.
- [40] Sheng J J, Maini B B, Hayes R E, et al. Critical review of foamy oil flow [J]. *Transport in Porous Media*, 1999, 35(2): 157-187.
- [41] Mastmann M, Energie P, Moustakis M, et al. Prediction of foamy oil recovery [C]. SPE Western Regional Meeting, Bakersfield, California, USA, 26-30 March 2001.
- [42] Joseph D D, Kamp A M, Bai R. Modelling foamy oil flow in porous media II: Nonlinear relaxation time model of nucleation [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2002, 28 (10): 1659-1686.
- [43] Joseph D D, Kamp A M, Bai R. Modeling foamy oil flow in porous media II: Nonlinear relaxation time model of nucleation [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2003, 29(9): 1489-1502.
- [44] Arora P, Kovscek A I. A mechanistic modeling and experimental study

- of solution gas drive [J]. *Transport in Porous Media*, 2003, 51 (3): 237-265.
- [45] 李剑, 张训华. 泡沫油流渗流规律数学模型及其数值解[J]. 辽宁工程技术大学学报: 自然科学版, 2009, 28(增刊): 139-141.
- Li Jian, Zhang Xunhua. *Journal of Liaoning Technical University: Natural Science Edition*, 2009, 28(S): 139-141.
- [46] 赵瑞东, 吴晓东, 王瑞河, 等. 稠油冷采泡沫油中气泡成核生长机理研究[J]. 特种油气藏, 2011, 18(3): 78-81.
- Zhao Ruidong, Wu Xiaodong, Wang Ruihe, et al. *Special Oil & Gas*, 2011, 18(3): 78-81.
- [47] 刘彦成, 王健, 刘彦武, 等. 稠油出砂冷采后 VAPEX 提高采收率技术的可行性研究[J]. 国外油田工程, 2010, 26(10): 10-13.
- Liu Yancheng, Wang Jian, Liu Yanwu, et al. *Foreign Oilfield Engineering*, 2010, 26(10): 10-13.

(责任编辑 吴晓丽)

·学术动态·

## “第二十六届中国(天津)2012 IT、网络、信息技术、电子、仪器仪表创新学术会议”征文

“第二十六届中国(天津)2012 IT、网络、信息技术、电子、仪器仪表创新学术会议”将于 2012 年 9 月 1 日在天津市召开。本次大会由北京市电子学会、天津市电子学会、天津市仪器仪表学会、重庆市电子学会、四川省电子学会、河南省电子学会、黑龙江省电子学会、江西省电子学会、湖北省电子学会、河北省电子学会、山东省电子学会、江苏省电子学会、浙江省电子学会、云南省电子学会、宁夏回族自治区电子学会、新疆维吾尔自治区电子学会、甘肃省电子学会联合主办。

征稿范围:(1) 电子信息整机产品, 电子元器件, 器件连接器、加工设备、工具、监测仪器的创新发展;(2) 计算机与网络系统在科学工程中的应用;(3) 计算机系统在控制系统中的应用;在系统集成技术中的应用;(4) 计算机软件技术、专家系统、神经网络系统;(5) 节能减排技术的应用与发展;(6) 多媒体技术及其应用;(7) 电子影像技术的发展与应用;(8) 扩频通信技术的应用;(9) 信号处理技术的新发展;(10) 数字电子技术的发展与应用;(11) 绿色电子制造与表面贴装技术(SMT)新发展;(12) 自动化仪表、分析仪器、光学仪器、环保仪器、电子测量仪器、电工测量仪器、医疗仪器技术发展应用与探讨;(13) 现场总线技术与智能化仪表, DCS 系统设计与应用;(14) 通信技术、广播电视技术、计算机技术的创新;(15) 抗干扰技术的发展;(16) 智能化大厦与系统;(17) 智能化系统工程, 工厂自动化系统;(18) 办公自动化设备的新发展;(19) 最新汽车发展技术;(20) 变频器、可编程控制器创新发展;(21) 电子机械技术的发展与应用;(22) 计量仪表的发展与科学发展趋势;(23) 电子声学及声学工程;(24) 防噪音系统;(25) 工艺与产品质量;(26) 光电子与激光技术的发展与应用;(27) 电子产品的市场与物流;(28) 新产品、新工艺、新材料(电缆及功能材料)、工艺装备、加工设备的发展;(29) 经验探索与其他。

论文截稿日期: 2012 年 7 月 20 日。

联系电话: 022-23321895, 022-23302458, 022-523304241。

通信地址: 天津市和平区大同道 20 号 409 室 (300040)。

电子信箱: tjdzxh@163.com。

会议网站: <http://www.tj-ei.com/shownews.asp?newsid=2345>。