

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2014.02.005

不同物性的储层砂岩出砂力学响应分析

刘先珊¹, 张林², 秦鹏伟¹, 刘洋¹, 李栋梁¹

(1. 重庆大学土木工程学院; 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045;

2. 重庆市电力公司, 重庆 400015)

摘要: 储层砂岩是由砂岩颗粒胶结而成的沉积岩, 同一区域的物性特征不尽相同, 油藏开采时的地层响应和出砂也会有差异。以2种不同的储层砂岩为研究对象, 基于柱坐标系的三维颗粒流数值模型, 模拟射孔围压和油藏流速一定时的砂岩宏观力学响应, 分析出砂的发生和发展过程。砂岩的宏观应力曲线表明砂岩颗粒间的弱胶结性越弱, 胶结物质含量越少, 砂岩越容易屈服破坏, 出砂越容易。砂岩的黏结应力分布同样说明储层的砂岩颗粒越小、胶结含量和胶结程度越小, 离散的颗粒越多, 颗粒接触上的受力越大, 砂岩破坏越严重, 出砂的几率越大; 同时, 颗粒的位移和旋转也说明胶结物质对储层砂岩力学特性和出砂的影响较大, 与上述研究成果一致。储层开采中, 不同物性的储层砂岩力学响应不同, 出砂特性有差异, 需要针对实际的储层物性和赋存环境, 采用适宜的出砂预测方法和防砂手段。

关键词: 储层砂岩; 出砂; 三维颗粒流程序; 力学响应; 不同物性

中图分类号: TU45 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2014)02-0028-07

Analysis of Mechanical Response for Different Physical Property of Reservoir Sandstone

Liu Xianshan¹, Zhang Lin², Qin Pengwei¹, Liu Yang¹, Li Dongliang¹

(1. School of Civil Engineering; Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China; 2. State Grid Chongqing Electric Power Company, Chongqing 400015, P. R. China)

Abstract: The reservoir sandstone is the sedimentary rock with many cemented sand particles. The different physical property of the reservoir even in the same area results in different mechanical response and sand production of the sandstone. Taking two types of the reservoir sandstones as research subjects, a numerical model based on 3-Dimensional Particle-based Distinct Element (PFC3D) under cylindrical coordinate system was used to simulate the micro-micro response of the sandstone considering the given confining pressure and the oil flow rate. Meanwhile, the sanding initiation and the process of the development were analyzed. The macro stress indicated that the reservoir sandstones with weaker cemented sand particles and less percent of the cemented materials would yield and fail more easily, the sand production was initiated more easily as well. Meanwhile, the stress of the parallel bonds indicated that the reservoir sandstones with granule and less cemented materials dislodged from the sandstone more easily, and the force on the particle contact was larger and the sandstone failure was more serious. Hence, the probability of the dislodged particles flowing

收稿日期: 2013-07-31

基金项目: 重庆市自然科学基金(cstc2012jjA90005); 国家重点基础研究发展计划(2014CB04690x); 武汉大学水资源与水工程科学国家重点实验室开放基金(2012B100); 中央高校基本科研业务费(106112013CDJZR00004); 国家自然科学基金(51109231)

作者简介: 刘先珊(1978-), 女, 博士, 副教授, 主要从事水电结构及岩土工程数值计算研究, (E-mail) liuxianshan@163.com。

into the wellbore was also much more. In addition, the particle displacement and rotation indicated that the physical property of the sandstone played a significant influence on the mechanical response and the sand production, the results also agreed with the above results. Therefore, the sand mechanical response and sand production of reservoir sandstone are both different due to different physical property of the reservoir. As a result, the reliable measures of the sand prediction and sand control will be adopted based on the reservoir physical property and conditions.

Key words: reservoir sandstone; sand production; 3-Dimensional particle-based distinct element; mechanical response; different physical property

储层开采过程中,油井出砂与产能提高的平衡问题一直受到不少学者和工程人员的关注,解决该课题对石油的可持续发展具有重要的实践意义。目前,随着油藏勘探难度的增大,优质储量的减少,不同物性特征的砂岩储层陆续投入开发。不同物性的储层由于沉积时间、埋深、岩性、砂岩颗粒的粒度分布、砂岩颗粒的形状和排列以及砂岩颗粒间的黏结物质等存在差异,直接影响着砂岩的受力性能,间接干扰了油藏开采中的油井出砂对生产产能的作用效应。由此可见,出砂机理的研究^[1]能提供有效的出砂预测和防砂措施,具有重要的实践价值。但不同物性的储层即使在相同的赋存环境中,也会出现不同的出砂率和出砂量,文献^[2-5]基于室内试验和理论分析了储层的物性特征,其结果表明储层物性的差异形成不同的岩石内部结构,砂岩颗粒在油藏流动过程中的运动轨迹就会有差异。与此同时,有些学者^[6-7]分析了不同的颗粒形状和黏结物质对储层砂岩的孔隙率和渗透性的影响较大,为研究细观结构对储层岩石力学的影响提供了重要的技术手段。上述研究成果说明不同物性储层的组成结构不同,外力的扰动导致储层结构发生变化,岩层的力学响应不同,出砂机理也有较大的差异。因此,需要对不同物性储层的出砂机理进行研究,以解决出砂与产能提高之间的矛盾。

目前,关于出砂机理的研究主要基于室内试验、理论计算和数值分析。由于室内试验的局限性和理论分析的简化,目前的数值分析大多基于宏观力学理论,如汪绪刚^[8]建立连续介质模型研究油井出砂,未能反映出砂过程中砂岩颗粒的运动特征。随着数值计算理论和计算机性能的提高,一些学者从细观角度研究砂岩颗粒的运动,如 Papamichos 等^[9]、Jensen 等^[10]、Li 等^[11-12]建立了笛卡尔坐标系下的出砂模型,描述二维达西渗流作用下的砂岩颗粒运动,未考虑颗粒间的胶结对砂岩颗粒运动的影响,但为细观角度研究砂岩出砂提供了重要的技术手段。

对于实际储层的射孔试验,基于笛卡尔坐标系模拟射孔的力学边界和渗流边界较复杂,为了提高计算结果的可靠性,基于刘先珊^[13-14]提出的三维颗

粒流数值模型分析油藏开采过程中的砂岩力学响应。为了更准确地反映不同物性的储层对出砂的影响,主要考虑砂岩颗粒的粒径、粒度分布、颗粒间的胶结物质等不同的两种砂岩储层,在围压和油藏流速相同的情况下,模拟油藏流动过程中的流固耦合效应,分析砂岩的宏观力学响应以及出砂的发生发展过程,其成果可为实际储层开采过程中的出砂预测和砂控优化提供新的研究思路。

1 数值建模

模拟两种储层砂岩,基于射孔的特征建立射孔的物理模型,如图 1 所示,两个模型的几何尺寸为:外径 75 mm,内径 6 mm 和高度 12 mm。根据砂岩颗粒的分布曲线(如图 2 所示)生成砂岩颗粒,建立柱坐标系下的三维颗粒流数值模型^[13-14],如图 3 所示的俯视图,两种储层的结构特性如表 1 所示。图 2、图 3 的颗分曲线、颗粒分布图及表 1 的颗粒特性比较显示:第 1 种储层砂岩的粒径较小,均匀的粒径使得这些小颗粒的接触颗粒过少,外力作用下易成为“漂浮”颗粒,而第 2 种储层砂岩的粒径分布范围较大,初始孔隙率相对较大,外荷载作用下形成较为密实状态;另外,第 1 种储层砂岩的胶结程度和胶结百分含量(采用胶结半径比 $\alpha = \frac{\bar{R}}{R_A}$ 表示, \bar{R} 为胶结平均半径, R_A 为接触处颗粒中的较小半径)、胶结百分含量(采用颗粒胶结数/模型总接触数表示)均较低,说明砂岩颗粒间的黏结物质较少,且黏结性较差,同样的外力作用下胶结物质承担的应力更大,颗粒间的胶结物质更容易破坏,砂岩颗粒成为离散的颗粒,这些离散的颗粒成为出砂的几率更大。

由于储层砂岩是由砂岩颗粒胶结而成的沉积岩,颗粒间的胶结物质使得砂岩的受力不同于无黏结砂岩,数值计算中采用具有一定胶结程度的平行黏结模型^[13-14]来模拟储层砂岩的胶结特性。另外,油藏开采过程中,油藏的流动与砂岩颗粒之间相互作用,即流固耦合作用,该作用力对整个砂岩模型的受力产生重要的影响,数值计算中要重点模拟。数值计算中,基于图 1 设置上、下两个水平边界以及两个内外半径组合而成的环形边界,将整个砂岩模型

划分为 288 个单元^[13-14], 计算参数如表 1 所示, 其参数是对同尺寸的圆柱模型进行数值模拟, 不断调整参数使之与试验曲线一致, 如图 4 所示, 两种储层砂岩显示数值计算结果与试验结果相吻合, 其参数可作为后续分析。

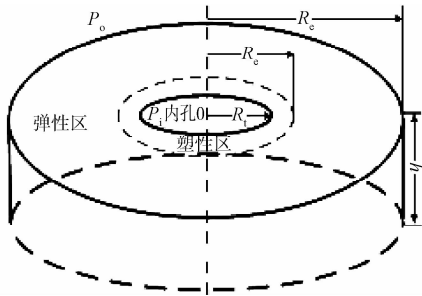


图 1 射孔物理模型

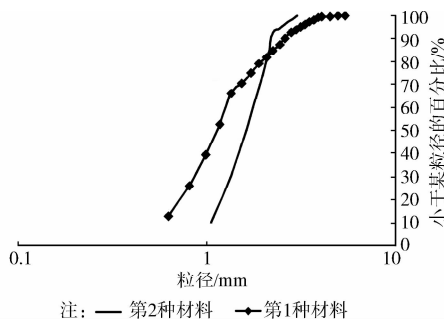


图 2 颗粒分布曲线

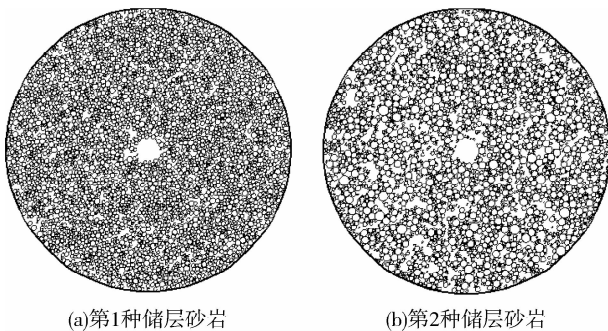


图 3 两种储层砂岩颗粒模型的俯视图

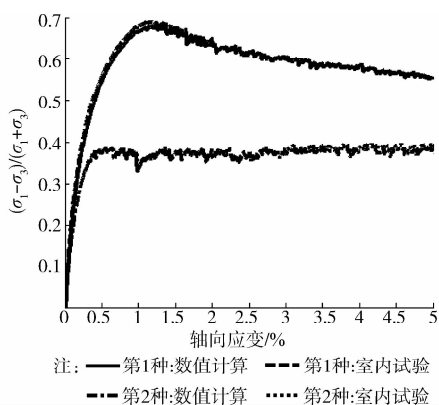


图 4 两种储层砂岩应力曲线比较

储层参数	第 1 种储层砂岩	第 2 种储层砂岩
砂岩颗粒形状	主要为有棱角的石英岩	主要颗粒偏圆形的石英岩
砂岩颗粒主要成分	主要为粘土	主要为高岭石
颗粒半径范围/mm	0.525~1.5	0.315~2.7
颗粒胶结百分含量/%	37	52
胶结程度 α	0.4	0.5
模型颗粒总数	40 140	37 129
颗粒摩擦系数 μ	0.5	0.5
平行粘结法向强度 S_{nb}^0 /kPa	1.0×10^6	1.25×10^6
平行粘结切向强度 S_{tb}^0 /kPa	1.25×10^6	1.50×10^6
流体密度 ρ_f / $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	760	760
动力粘滞系数 μ_f / $10^{-3} \text{Pa} \cdot \text{s}$	1.48	1.48

对生成的初始三维颗粒流模型进行力学计算达到准静止平衡; 然后基于 PFC3D 的 Fish 语言导入平行粘结的信息模拟实际储层砂岩的胶结性状, 之后开始流固耦合分析, 直至达到力学平衡。流固耦合分析主要是计算油藏流动与砂岩颗粒间产生的相互作用力 $f_{d_{ij}}(i)$ ($i=1, \dots, n_p, j=r, \theta, z$), 根据文献[13-14]计算作用于颗粒上的作用力 (N) 如表达式 (1):

$$f_{d_{ij}} = - \left(\frac{\beta_{m_{ij}}}{1-n} (\bar{v}_j - u_j) + \nabla p_j \right) \frac{\pi}{6} d_{pi}^3 \quad (1)$$

式中: n_p 为砂岩颗粒的总数, d_{pi} 为颗粒直径, m, n 为每个流体单元的孔隙率; \bar{v}_j, u_j 分别为颗粒运动的平均速度 (m/s) 和流体实际流动速度 (m/s), r, θ, z 代表柱坐标系的 3 个方位; $\beta_{m_{ij}}$ 为由于流体与颗粒运动速度不同而产生的拖曳力作用系数 ($\text{Pa} \cdot \text{s}/\text{m}^2$), 根据三维 Navier-Stokes 方程得到^[13-14]:

$$\beta_{m_{ij}} = 150 \frac{(1-n)^2}{n \bar{d}_p^2} \mu_f + 1.75 \frac{(1-n) \rho_f}{\bar{d}_p} |\bar{v}_j - u_j| \quad (2)$$

∇p_j 为流体的压力梯度 (Pa/m), 根据 Ergun 方程^[13-14] 得到;

$$\nabla p_j = (150 \frac{(1-n)^2}{n \bar{d}_p^2} \mu_f + 1.75 \frac{(1-n) \rho_f}{n \bar{d}_p} |\bar{v}_j - u_j|) (\bar{v}_j - u_j) \quad (3)$$

其中: ν_f, ρ_f 为流体的运动粘滞系数 (m^2/s) 和密度, kg/m^3 , g 为加速度, m/s^2 ; $u_{j,0}$ ($j=r, \theta, z$) 为流体流动的表现速度, m/s ; \bar{d}_p 为颗粒的平均直径, m 。

2 计算结果分析

对于砂岩储层, 即使在相同的区域, 由于地质构造的不同, 其物性特征也会有差异, 油藏开采过程中砂岩的力学响应不同, 出砂的发生和发展过程也有差异。本文模拟了两种储层砂岩在围压 10 MPa、油藏流速 4 m/s 时的宏观力学响应, 比较分析了两种储层砂岩的出砂特性。

2.1 砂岩宏观力学特性的研究

射孔围压相同时, 油藏流动对颗粒的作用力导

致砂岩应力状态的改变,颗粒间的胶结越弱,越容易失去胶结而成为离散颗粒,并被流体携带形成出砂。图5比较了两种不同储层砂岩在相同围压和流速时的切向应力 $\frac{\sigma_{\theta}}{\sigma_{r0}}$ 随 r/R_i (r 代表任意位置到射孔中心点的距离)的变化曲线。其结果显示两者的应力曲线差别较大,第1种储层砂岩相较于第2种砂岩的应力峰值较大,且峰值应力点的位置离射孔中心点较远,说明在相同的赋存环境中,油藏运动对第1种储层砂岩力学特性的影响较大。如表1所示第1种储层砂岩的粒径较小,与小粒径颗粒相接触的颗粒数较少,这些小粒径颗粒在外力作用下更容易成为离散颗粒;另外,第1种储层砂岩的胶结百分含量和胶结程度均较低,同样的外载环境中颗粒胶结的破坏更容易一些。对于本文砂岩赋存环境,围压相同时,初始时刻相同的油藏流速对两种砂岩颗粒的作用力是相同的,随着流固耦合的进行,由于第1种储层砂岩胶结物质的黏结性要差一些,胶结破坏更严重,颗粒的自由度较大,粒径较小的颗粒随流体进入射孔中,使得承担外力作用的颗粒数减少,砂岩的应力增大更多,整个砂岩模型对应的塑性区也更大一些。图5的结果表明,在相同的外界条件下,由于储层物性特征的不同,特别是砂岩颗粒间的胶结物质对砂岩力学响应的影响很大,由于颗粒间的弱胶结性,油藏的运动对颗粒的作用力更容易削弱颗粒的强度特性,颗粒间胶结破坏越严重,越容易在流体的作用下携带进入油井而形成出砂。因此,不同物性储层的出砂发生和发展过程有差异,实际的油藏开采中,即使是在同一区域,也会由于储层砂岩微观结构的不同导致出砂不同,因此不能一概而论,需要针对具体的储层出砂给出具体的出砂预测和防砂措施。

图5可以根据砂岩的切向应力反映砂岩的峰值应力和塑性区,为了更清晰地描述整个储层出砂过程,本文研究了油藏开采中的砂岩偏应力变化,如图6~7所示的偏应力 $\sigma_{\theta} - \sigma_r$ 和 $\sigma_{\theta} - \sigma_z$ 与 r/R_i 的关系曲线。其结果显示第1种储层砂岩对应的偏应力峰值更大,且偏应力峰值点的位置距离射孔中心点要远,与图5的结果是一致的,说明第1种储层砂岩的塑性区更大一些,破坏更为严重。

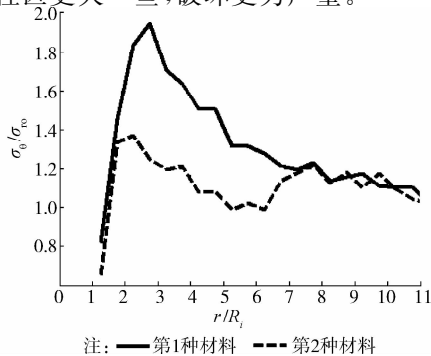


图5 储层砂岩模型 $\frac{\sigma_{\theta}}{\sigma_{r0}}$ 应力分布图

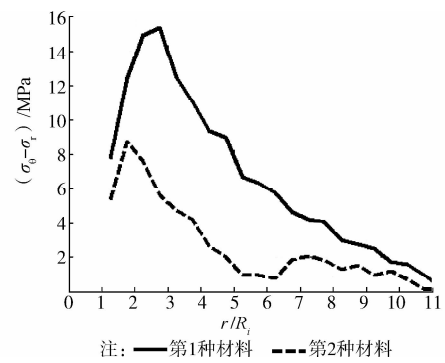


图6 不同位置对应的偏应力 $\sigma_{\theta} - \sigma_r$ 分布

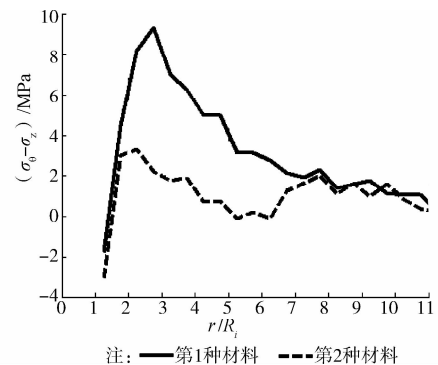


图7 不同位置对应的偏应力 $\sigma_{\theta} - \sigma_z$ 分布

图6和图7的结果还可以通过分析整个砂岩的分区应力来解释。分区应力以已有计算结果为基础,区域内的颗粒应力加权平均后作为该区域的平均应力。图5和图6显示两种砂岩的塑性区距离射孔中心点距离大约18 mm和12 mm,可选择每个区域的厚度为3 mm,则将模型分成23个区域,如图8所示。分区数量对塑性区范围和砂岩受力特性无影响,但影响图10曲线的比较:分区太多,每个区域的应力增量相对较小,显示在图10中的应力曲线较接近,影响了不同材料响应曲线的比较,如第一种材料的塑性区距离中心点大约18 mm,每个区域的厚度若为1 mm,分区数量至少大于12个,才能获得如图10所示的塑性区附近的应力曲线;而分区太少,塑性区太小的储层力学响应曲线在图10中无法显示。

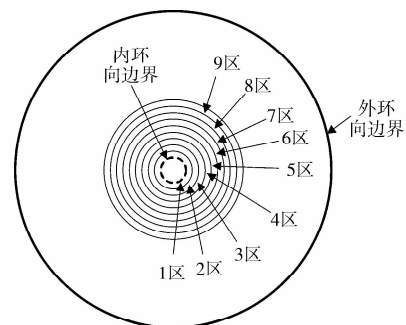


图8 模型分区图

根据数值计算结果,建立图9~10来分析偏应力 $\sigma_\theta - \sigma_r$ 与平均应力 p 之间的关系,并与试验得到的屈服包络线和峰值包络线进行比较研究。图9显示相同的油藏流速条件下,第1种储层砂岩的偏应力曲线与屈服曲线相交更为容易,且当流速为5 m/s时,第1种储层砂岩已与峰值曲线相交,而第2种储层砂岩的偏应力曲线与屈服曲线和峰值曲线还比较远,砂岩破坏的几率较小。另外,图10描述了砂岩模型不同分区的偏应力分布,结果表明第1种储层砂岩与屈服曲线的相交更为容易,距离射孔中心18 mm的区域均为塑性区,与图5的结果一致,而第2种储层砂岩与屈服曲线相差较远,砂岩屈服破坏的可能性较小,塑性区也只位于油井附近,主要是流体携带离散颗粒到射孔附近,使得射孔堵塞而导致砂岩应力的增大,砂岩局部破坏。根据上述的偏应力变化规律可知,由于储层的物性特征不同,整个砂岩的屈服包络线和峰值包络线也有差异,对于砂岩颗粒胶结较弱和胶结含量较少的储层,相同外力作用下的颗粒胶结破坏越严重,砂岩骨架破坏越严重,形成的出砂通道越多,离散颗粒被流体携带的可能性越大,出砂越多。

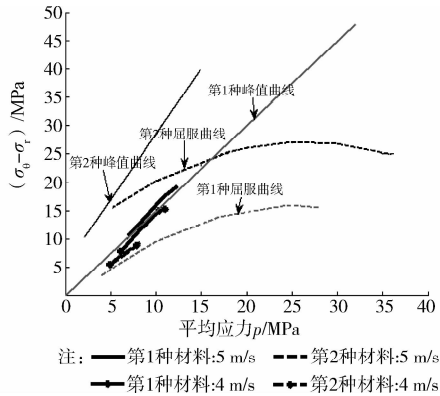


图9 平均应力与 $\sigma_\theta - \sigma_r$ 之间的关系

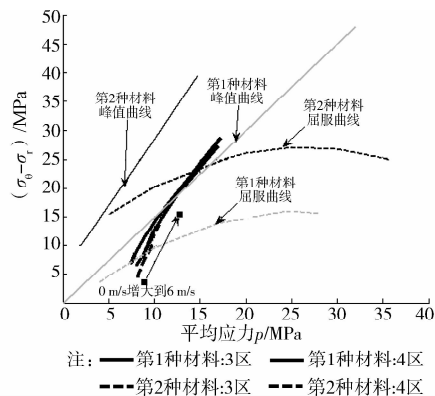


图10 不同分区内的平均应力与 $\sigma_\theta - \sigma_r$ 之间的关系

2.2 砂岩细观力学特性的研究

上述砂岩的宏观应力图形说明了在围压和油藏运动的共同作用下,砂岩更容易发生剪切破坏,且胶结较弱的砂岩模型更容易破坏,砂岩颗粒从砂岩母体上剥离更容易,出砂量更多。为了更清晰地解释储层的出砂机理,本文从细观角度研究砂岩颗粒的力学特性。

图11和图12描述了砂岩颗粒粘结的平均张拉应力和剪应力的变化。两个图形均表明第1种储层砂岩的应力较大,说明油藏的运动对该储层砂岩应力的影响较大,主要在于该储层颗粒较小,与之连接的颗粒数较少,外力作用下成为自由颗粒的可能性要大;另外,该储层的胶结含量和胶结程度要小,其胶结物质的黏结性相比第2种储层要小,相同的外力作用下,第1种储层砂岩的胶结物质更容易破坏,并被流体携带至射孔内,能承受外力作用的砂岩颗粒逐渐减少,颗粒上的接触应力增强,则平行粘结上的应力增大较多。图12与图11比较可能,在砂岩模型相同的位置,黏结上的剪应力要比张拉应力大,在离射孔中心点较远的位置,剪应力仍然较大,说明第1种储层砂岩的屈服破坏主要取决于剪应力的状态,与前述的图9、图10相吻合。

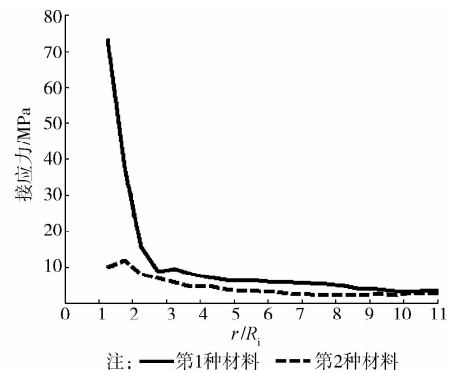


图11 不同位置对应的张拉应力分布

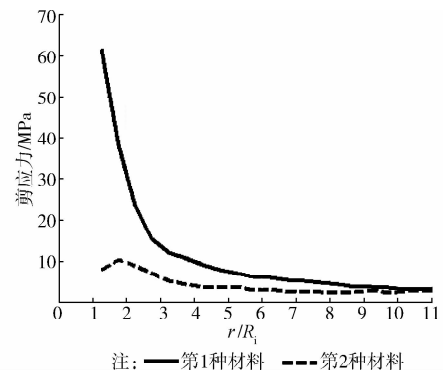


图12 不同位置对应的平行粘结剪应力分布

图13和图14从细观角度描述了颗粒的位移。图13的结果可知射孔附近的砂岩颗粒位移较大,且第1种砂岩模型对应的位移要大一些。其结果同样说明第1种储层砂岩由于颗粒间的胶结性较差,相同的赋存环境中,砂岩受剪破坏更容易,离散的颗粒越多,则出砂几率越大。同时,图14描述了不同粒径的颗粒对应的平均位移,其结果说明直径越小的颗粒其位移值越大,且对于相同的砂岩粒径,第1种储存砂岩颗粒的位移要大,其结果同样说明粒径较小的颗粒周围接触的颗粒较少,颗粒与颗粒间的胶结性较差,砂岩更容易破坏,形成的颗粒运移通道更多,小尺寸颗粒更容易在这些通道中移动,出砂更容易。

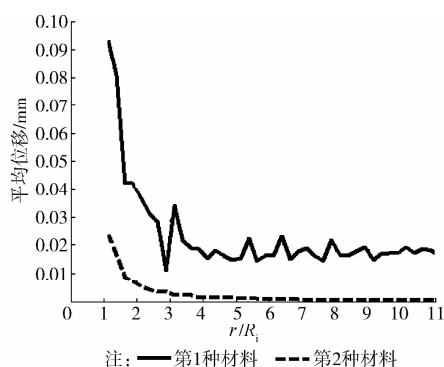


图13 不同区域内颗粒的平均位移

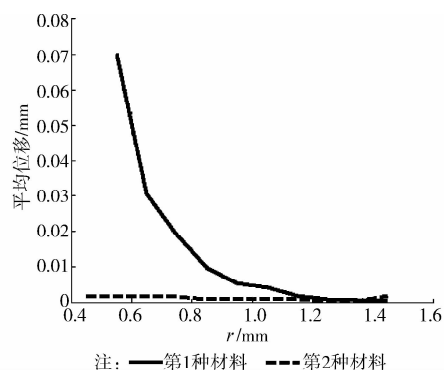


图14 不同半径的颗粒对应的平均位移

另外,还分析了两种储层砂岩的颗粒转动,如图15所示。其结果显示第1种储层砂岩颗粒的转动较大,且转动较大值的范围大,而第2种中砂岩颗粒转动较大值的范围小,只出现在油井附近,两者的比较说明第1种储层砂岩更容易出砂。其结果同样说明在外界条件相同时,储层物性对砂岩出砂的影响较大,由于第1种储层砂岩颗粒较小,且颗粒间的胶结性较弱,油藏流动对颗粒的拖曳力较大,应力增大使得砂岩屈服破坏范围加大,则颗粒间的平行粘结破坏就越多,失去胶结的砂岩颗粒也越多,被流体携带

至油井的砂岩颗粒越多,与图13和图14描述的变化规律一致。

上述图形显示外界条件一定时,储层砂岩的物性特征不同表征的出砂力学响应不同。特别是对小粒径且胶结性较弱的储层砂岩,颗粒与颗粒较少的连接使得颗粒的自由度更大,且较差的胶结性使得砂岩更容易破坏,从砂岩母体上剥离的颗粒越多,砂岩骨架破坏越严重,则油藏携带砂岩颗粒至油井的几率越大。上述数值模拟反映了油藏开采过程中的砂岩力学响应和出砂特征,是可行的。在实际的油藏开采中,即使在同一区域,由于位置的不同也会导致储层物性特征的不同,出砂的发生和发展过程也会有差异,因此需要针对具体的储层开采进行出砂预测和防砂优化。

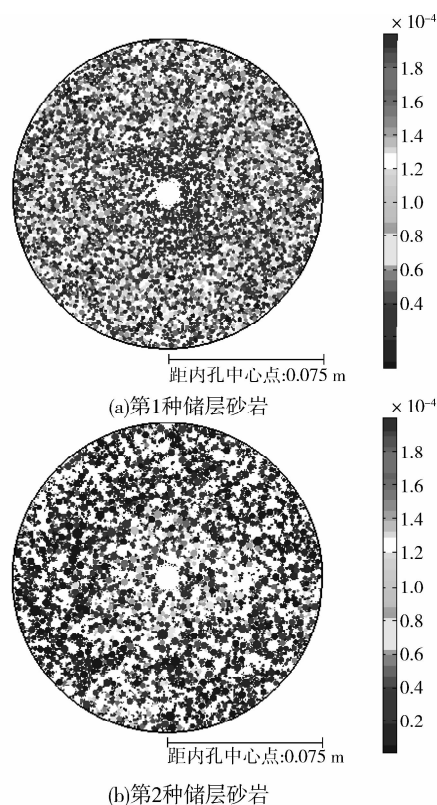


图15 不同出砂砂岩对应的颗粒转动

3 结论

基于柱坐标系下的三维颗粒流数值模型,分析了不同物性的储层砂岩力学响应,据此分析出砂的发生和发展过程。

1)砂岩的宏观应力结果显示油藏开采过程中,颗粒较小且胶结性较差的第1种储层砂岩应力变化更明显,且峰值应力和塑性区也较大。其结果表明油藏的运动对该储层的干扰较大,对颗粒产生的拖

曳力较大,颗粒胶结破坏多,砂岩骨架破坏严重,形成的通道越多,离散颗粒在这些通道中的移动更容易,出砂几率较大。

2)砂岩模型的细观力学图形描述了砂岩黏结应力的变化以及颗粒的位移和转动。其结果说明第 1 种储层砂岩的应力较大,且运动更剧烈。主要在于第 1 种储层的颗粒较小,胶结性较差,油藏运动中颗粒胶结物质破坏严重,从砂岩母体上剥离的颗粒增多,增大了被油藏携带进入油井的几率。

上述研究结果表明,对于复杂赋存环境下的油藏开采,需要针对储层物性特征的差异进行出砂机理分析,才能提出有效的出砂预测和防砂优化方法,以实时改善油藏的开发效果。

参考文献:

- [1] 范小军, 黄勇, 厚东琳, 等. 储层物性与产能的关系—以元坝长兴组礁滩相储层为例[J]. 天然气技术与经济, 2011, 5(4): 29-32.
Fan X J, Huang Y, Hou D L, et al. Relationship between physical property and deliverability: an example from changxing biereef-shoal reservoir of yuanba area [J]. Natural Gas Technology and Economy, 2011, 5(4): 29-32.
- [2] 吴斌, 王兴志, 张帆, 等. 川北地区飞仙关组储层特征及其主控因素[J]. 现代地质, 2012, 26(1): 168-174.
Wu B, Wang X Z, Zhang F, et al. Reservoir characteristics and controp factor of feixiaguan formation in northern sichuan[J]. Geoscience, 2012, 26(1): 168-174.
- [3] 梁旭, 邓宏文, 秦雁群, 等. 大庆长垣泉三、四段扶余油层储层特征与主控因素分析[J]. 特种油气藏, 2012, 19(1): 58-61.
Liang X, Deng H W, Qin Y Q, et al. Reservoir characteristics and main control factors of the Q3 and Q4 members of Fuyu reservoir in Changyuan area, Daqing [J]. Special Oil and Gas Reservoir, 2012, 19(1): 58-61.
- [4] 李彬, 贺凯, 何治亮, 等. 准东地区石炭系风化壳储层特征及影响因素[J]. 石油天然气学报, 2012, 34(1): 20-24.
Li B, He K, He Z L, et al. Carboniferous weathered crust reservoir characteristics and influential factors in Zhundong area [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2012, 34(1): 20-24.
- [5] 李娇娜, 卢双舫, 郝爱萍. 胜利油区车古 20 潜山储层特征及储层评价[J]. 复杂油气藏, 2012, 5(1): 15-18.
Li J N, Lu S F, Hai A P. Characteristics and evaluation of reservoir in Chegu 20 buried hill of Shengli Oilfield [J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2012, 5(1): 15-18.
- [6] 周桦, 黄思静, 兰叶芳. 华庆地区长油层组黏土矿物类型及其对储层物性的影响[J]. 岩性油气藏, 2012, 24(3): 66-73.
Zhou H, Huang S J, Lan Y F. Types of clay minerals and its effects on reservoir properties of Chang 6 oil reservoir set in uaqing area [J]. Ordos Basin, Lithologic Reservoirs, 2012, 2012, 24(3): 66-73.
- [7] 李龙, 鞠斌山, 江怀友, 等. 油层微粒运移及其对储层物性的影响[J]. 中外能源, 2011, 16(12): 50-54.
Li L, Ju B S, Jiang H Y, et al. Fine grains migration and its effect on the physical properties of oil formations [J]. Sino-global Energy, 2011, 16(12): 50-54.
- [8] 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(Sup): 131-134.
Wang X G, Zou H L, Li G C, et al. Cold heavy oil production with limited sand influx and technology study for 6 bolck, Sudan [J]. Journal of liaoning technical university: Natural Science, 2009, 28(Sup): 131-134.
- [9] 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.
- [10] 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 Oeo`mechanics, Desai, EeL Tucson, Arizona, 2001: 819-822.
- [11] Li L, Holt R. Particle scale reservoir mechanics [J]. Oil and Gas Science and Technology, 2002, 57(5): 525-538.
- [12] Li L, Papamichos E, Cerasi P. Investigation of sand production mechanics using DEM with fluid flow [C]//Eurock 2006; Multiphysics Coupling and Long Term Behavior in Rock Mechanics; 241-247.
- [13] 刘先珊, 许明. 基于柱坐标系的油井出砂三维数值模型设计与研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(5): 871-878.
Liu X S, Xu M. Design and research on 3-dimensional numerical model of sand production in oil wellbore based on cylindrical coordinate system [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(5): 871-878.
- [14] 刘先珊, 许明. 基于三维流固耦合模型的油井出砂细观机理研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(8): 2363-2370.
Liu X S, Xu M. Micromechanism of sand production in oil well based on 3-Dimensional coupled fluid-solid model [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(8): 2363-2370.

(编辑 胡 玲)