

冲缝单元堵塞过程数值模拟研究

桂福林

长江大学, 湖北 荆州

收稿日期: 2022年12月2日; 录用日期: 2023年1月26日; 发布日期: 2023年2月2日

摘要

冲缝套作为独立防砂单元或优质筛管的常用保护壳, 常被用作防砂管的第一层挡砂单元, 然而大多数筛管在考虑其防砂性能时往往只考虑筛管内部挡砂介质的影响, 而忽略冲缝套的堵塞对于筛管整体挡砂性能的影响。为探究冲缝套的堵塞过程, 本文以微观的视角, 利用计算流体力学-离散元法(CFD-DEM)耦合的方法, 模拟单个冲缝套防砂单元在含有细粉砂的条件下内部颗粒、流体运动, 分析内部流动状态对颗粒运动的影响。结果表明: 冲缝单元堵塞过程分为开始初始、堵塞加剧、堵塞稳定三个阶段; 在堵塞开始阶段粗颗粒形成稀松的桥架结构; 堵塞加剧阶段颗粒聚集成砂团, 由两边缝口向单元中心发展; 堵塞平衡阶段细粉颗粒沉积, 呈现分层现象。

关键词

冲缝套, 堵塞, CFD-DEM, 分层

Numerical Simulation Study of Blockage Process of Punching Screen Unit

Fulin Gui

Yangtze University, Jingzhou Hubei

Received: Dec. 2nd, 2022; accepted: Jan. 26th, 2023; published: Feb. 2nd, 2023

Abstract

Punched seam sleeves are commonly used as a protective casing for individual sand control units or high quality screen tubes, and are often used as the first layer of sand retaining units for sand control tubes. However, most of the punching screen only consider the influence of the sand barrier media inside the screen pipe when considering its sand barrier performance, and ignore the influence of the blockage of the punching screen on the overall sand barrier performance of the screen pipe. In order to investigate the blockage process of the punching screen, this paper uses

the coupled computational fluid dynamics-discrete element method (CFD-DEM) to simulate the internal particle and fluid motion of a single punching screen sand control unit under the condition of containing fine powder sand, and analyze the influence of the internal flow state on the particle motion from a microscopic viewpoint. The results show that: the blockage process of the punching screen unit is divided into three stages: initial blockage, intensified blockage and stable blockage; the coarse particles form a loose bridge structure in the initial blockage stage; the particles gather into sand clusters in the intensified blockage stage and develop from the two slit openings to the center of the unit; the fine powder particles are deposited in the blockage equilibrium stage, showing the phenomenon of stratification.

Keywords

Punching Screen, Blocking, CFD-DEM, Stratification

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

我国大部分油田属于疏松砂岩储层,分布广泛,开发潜力巨大。由于其弱胶结或未固结、渗透率高,在生产过程中出砂的可能性比较高,而且出砂会危害井筒的完整性、工作人员和开发中的设备安全,增加开发成本和难度。目前需要防砂的油井大多采用机械筛管防砂。机械筛管作为一种简单有效的防砂手段,在油气田开发过程中经常使用,也是提高产能的重要手段。冲缝套广泛用作大多数优质筛管的外保护套[1],与单一割缝管相比,其特点是增加了筛管本身的渗流面积,间接提高了井液的流速[2]。但大多数筛管在考虑防砂性能时,只考虑了筛管内部挡砂介质的影响,而忽略了冲缝套作为直接与地层接触的挡砂元件的挡砂效果[3]。目前,对冲缝套堵塞过程及影响因素的研究较少。在实际生产过程中,由于冲缝套堵塞导致渗透率降低,进而造成产能降低的影响也非同小可。

了解冲缝套堵塞过程对研究其堵塞机制至关重要,目前关于防砂井筒堵塞的研究大多是针对于防砂筛管内部的挡砂介质进行的挡砂实验,董长银等人在2017年[4]进行了砾石层堵塞机理和规律实验,重点研究了不同和生产条件的定量变化规律,形成了可用的堵塞程度定量预测方法;2020年[5]针对于天然气水合物储层所有的泥质细粉砂特殊物性,进行气液携砂条件下防砂介质的挡砂堵塞模拟试验。建立包含挡砂、抗堵塞性和流通性能在内的天然气水合物储层泥质细粉砂挡砂介质综合性能评价方法。邓福成等[6]利用油气井防砂模拟实验装置模拟了微颗粒防砂过程中金属网布筛管的堵塞过程及堵塞机理,得出微颗粒成分及出砂次序对金属网布筛管堵塞机理的影响。

在这些研究均是通过实验等手段模拟筛管堵塞过程。但从实验上只能从宏观角度分析筛管渗透率、出砂量等数据,无法从微观角度观察筛管堵塞过程和对堵塞机理进行描述。为此,本文以微观视角采用计算流体力学-离散元法(CFD-DEM)耦合方法,模拟了冲缝单元的堵塞过程。

2. CFD-DEM 耦合方法

CFD-DEM 方法不需要离散颗粒在不同流动条件下的应力和应变张量之间的复杂构成关系,因此广泛适用于各种流动体系。此外,产生的微观信息,如单个颗粒所受的力及其运动轨迹,有助于理解颗粒流体流动的机理[7]。

随着计算机技术的不断进步,计算流体力学(CFD)和离散元方法(DEM)的耦合被引入到各种流固运动

学仿真中。CFD-DEM 耦合采用离散元法和 Hertz 的接触理论计算颗粒运动形态, 采用牛顿运动定律分析颗粒在筛管中的运动过程[8]。根据 Xu 和 Yu [9]的研究, 在每一个时间步, Fluent 求解连续流场的相关参数, 将数据传递给 EDEM 求解器, 计算颗粒间力, 与颗粒运动方程进行耦合计算, 获得离散相颗粒的数量、位移、速度等信息, Fluent 求解器从 EDEM 求解器中获取数据进而求解带有颗粒相的流场, 更新流动区域, 循环操作进入下一时间步长[10], 如图 1 所示。

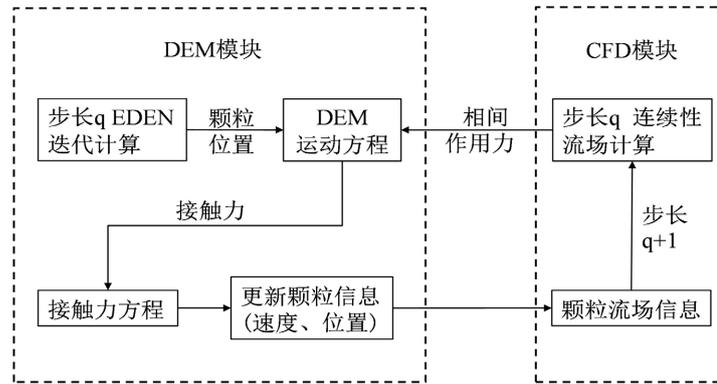


Figure 1. Flow chart of CFD-DEM coupling
图 1. CFD-DEM 耦合流程图

流体 - 砂粒间作用力

流体 - 砂粒间的相互作用力包括拖拽力、升力、浮力、重力、压力梯度力、Basset 力等[11]。在筛管堵塞模型中, 流体引导砂粒运动的主要作用力为拖拽力, 也是本文考虑的重点问题。拖拽力主要表现在流体与砂粒间的相互作用, 常用经验模型来计算, 其中 DiFelice 模型是研究粒子阻塞问题中最常见的模型。其表达式如式(5):

$$\begin{cases} F_{p,f} = \frac{1}{2} \pi C_d \rho_f r_p^2 |u_p - u_f| \varepsilon_f^{(2-\chi)} \\ \chi = 3.7 - 0.65 \exp \left[-\frac{(1.5 - \lg Re_p)^2}{2} \right] \end{cases} \quad (5)$$

式中 ρ_f 表示流体密度, kg/m^3 ; u_f 表示流体速度, m/s ; Re_p 表示流体砂粒雷诺数; r_p 表示砂粒半径, m ; u_p 表示砂粒速度, m/s ; C_d 表示拖拽力系数, 无量纲, $C_d = \left(0.63 + \frac{4.8}{\sqrt{Re_p}} \right)^2$; χ 表示校正系数; ε_f 表示孔隙度。

3. 冲缝单元分析模型

3.1. 冲缝单元模型

由于冲缝套特殊的梯形结构, 缓解了堵塞问题[12], 强度较高且抗腐蚀性强, 与地层流体直接接触, 在生产过程当中起到重要作用。在本文中的冲缝单元模型按实验冲缝片 1:1 建立, 如下图 2 所示, 其各部分尺寸为缝长 11 mm, 缝宽 4 mm, 开口高度为 0.3 mm。

3.2. 模拟参数设置

本文在结合相关文献[13]以及现场数据, 得到参数如下: 离散相参数为粒径中值为 238 μm , 非均质

系数 4.96, 细粉砂含量为 25%, 泊松比 0.3, 密度 2650 kg/m^3 , 弹性模量 100 Mpa, 恢复系数 0.3, 摩擦系数 0.5。流体相为水, 其密度为 998.2 kg/m^3 , 考虑单元体内有旋流及涡流产生, 因此在计算当中采用 $k-\varepsilon$ 湍流模型; 进出口边界条件当中, 入口条件为速度入口, 流速为 1.2 m/s , 方向如图 2(右)红色箭头所示, 出口条件采用压力出口, 出入口湍流强度控制皆为 5%。

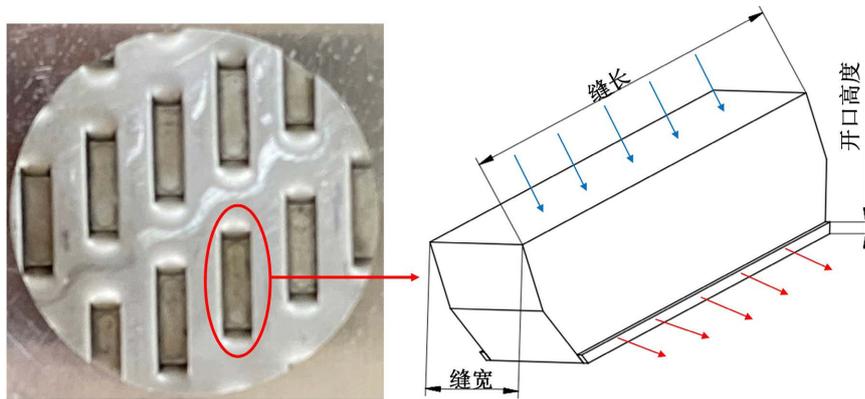


Figure 2. Punching screen unit model
图 2. 冲缝单元模型

3.3. CFD-EDEM 方法的准确性

随着计算机技术的不断发展, CFD 与 DEM 耦合被引入到各种, 液固运动学仿真中。比如地层出砂和防砂, 砂粒堵塞[14] [15]等方面的数值模拟研究。Song 等[16]模拟了在水动力下砂粒架桥的微观形成原理, 并探究了砂粒与筛管间摩擦系数对单缝筛网上砂桥稳定性的影响。Shaffee 等[17]使用 CFD-DEM 模型研究了砂粒间吸附力对多缝筛网滤砂性能的影响, 并证明了砂粒间吸附力的增加降低了筛网上泥饼的孔隙度和系统中的压差。Mengmeng Zhou [18]等采用 CFD-DEM 方法对垂直管道中粗颗粒的水力输送进行了研究。出了液体流动和粒子运动的控制方程及其数值实现。在此基础上, 对 CFD-DEM 方法进行了验证, 表明耦合 CFD-DEM 方法的使用是合理的, 目前的模型可以很好地预测所测量的趋势。

4. 冲缝单元堵塞过程分析

4.1. 堵塞过程

现目前大多数研究主要还是基于在挡砂介质的宏观挡砂实验, 针对携带细粉砂流动条件下挡砂介质微观挡砂过程和规律还缺乏系统的了解。冲缝单元的堵塞过程总体呈现 $0-t_0$ 开始堵塞、 t_0-t_1 堵塞加剧和 t_1-t_2 堵塞平衡 3 个阶段如图 3 所示。文中出现的渗透率比指的是冲缝单元实时渗透率与初始渗透率的比值, 无量纲。渗透率比越小, 说明冲缝单元的堵塞程度越高。

在堵塞的开始阶段, 随着砂粒增多, 缝口将粒径较大的颗粒拦在冲缝单元内部, 造成渗透率降低, 通过冲缝单元出入口压差增大, 少量粗组分颗粒挡在缝口, 大体上呈现由两端倒角处向底部中心发展, 大粒径颗粒滞留在冲缝单元内部, 如图 4(a)所示, 此时形成较为疏散的具有一定流通性的桥架结构, 起到一定的防砂作用, 比缝口尺寸小的颗粒从缝口通过, 过砂量较高。

随着堵塞程度的不断加深, 砂粒在冲缝单元内部堆积到一定数量, 流动空间减小, 在缝口处由粒径较大的颗粒形成一条较完整的砂桥, 除了粗组分的砂粒无法通过, 部分小组分颗粒也无法通过, 并出现较小颗粒与细粉颗粒附着在大颗粒附近形成砂团, 从倒角处由各砂团组合聚集成更大得砂团, 造成堵塞,

如图 4(b)所示；同时砂粒间间隙尺寸逐步降低，使得冲缝单元能够阻挡更细得砂粒，颗粒流通性能变差，挡砂性能提高，冲缝单元内外压差增大，流动阻力增加，渗透率下降。

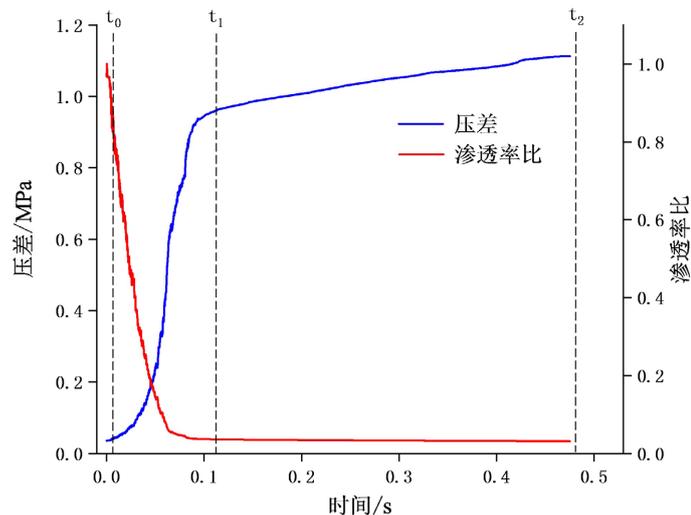


Figure 3. Variation of differential pressure and permeability ratio during the simulation

图 3. 模拟过程中压差和渗透率比变化

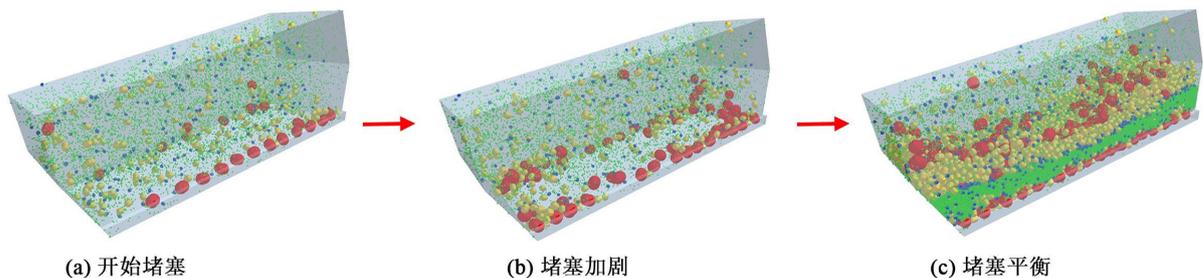


Figure 4. Numerical simulation of plugging process of punching screen unit

图 4. 冲缝单元数值模拟堵塞过程

随着堵塞的继续进行，堵塞颗粒越多，从冲缝单元倒角两端砂团不断聚集累积，逐步发展成完整的砂桥，进而从两端进而覆盖到中心，如图 4(c)所示，且由于冲缝单元挡砂结构空间有限，当此空间被侵入的砂粒堆积充满后，堵塞愈加严重，有且仅有极小部分细粉颗粒通过缝口，堵塞达到平衡状态；堵塞呈现明显分区现象，如图 5 所示，在缝口大颗粒形成的砂桥后方，在大颗粒之间还存在较小的空隙，有且仅有细颗粒能够通过，且随着流体向缝口移动；较细颗粒由缝口处向内部堆积，形成完整的两条由细粉颗粒构成的挡砂层，较小颗粒及细粉砂不断沉积，形成更加致密的桥架结构，拥有更小的孔喉结构，这也是冲缝单元能够阻挡细小颗粒的原因，较大颗粒则集中在冲缝单元中心，在此时冲缝单元挡砂能力基本稳定，渗透率稳定在较低的水平[19]。

4.2. 冲缝单元的两端挡砂形式

根据 Coberly 原则选择开口高度[20]。通过分析，在开口高度选择恰当的情况下，冲缝套防砂单元的堵塞机理可分为以下两种挡砂形式：

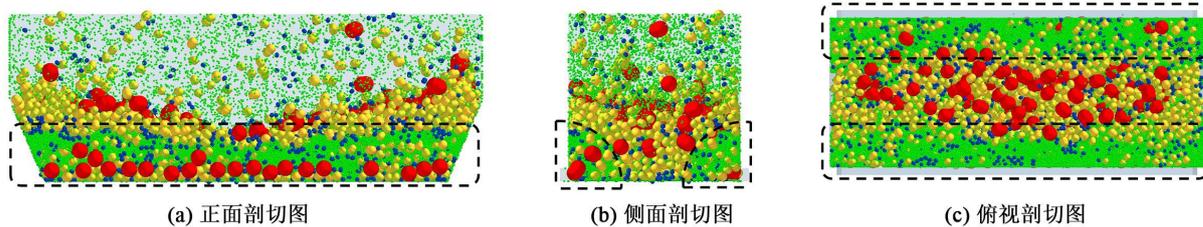


Figure 5. Stratification during the blocking equilibrium stage
图 5. 堵塞平衡阶段分层现象

1) 大颗粒卡死缝口挡砂；直径较大的砂粒在开口处被卡住，流通面积减小，颗粒在此聚集，形成颗粒团造成的堵塞。同时，阻止了其它直径较小的砂粒通过，彻底减小了筛缝的过流面积。如图 6 中红色圆圈所示，颗粒之间的相互作用力指向卡在缝口的大颗粒。

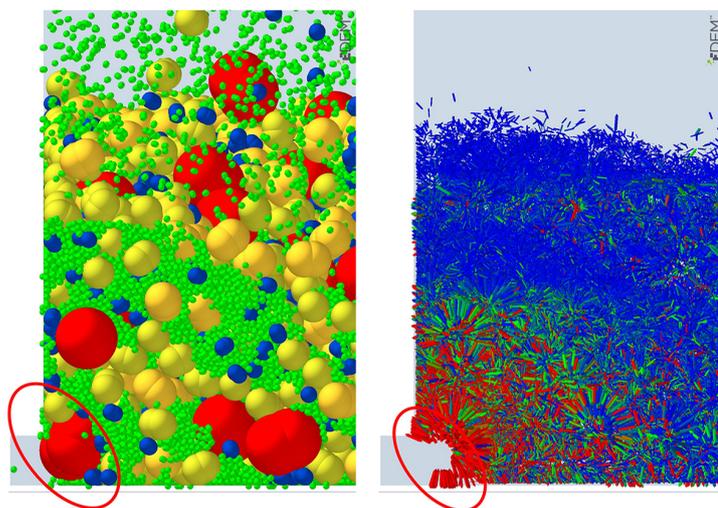


Figure 6. Particle jamming punching screen unit opening
图 6. 颗粒卡死冲缝单元开口

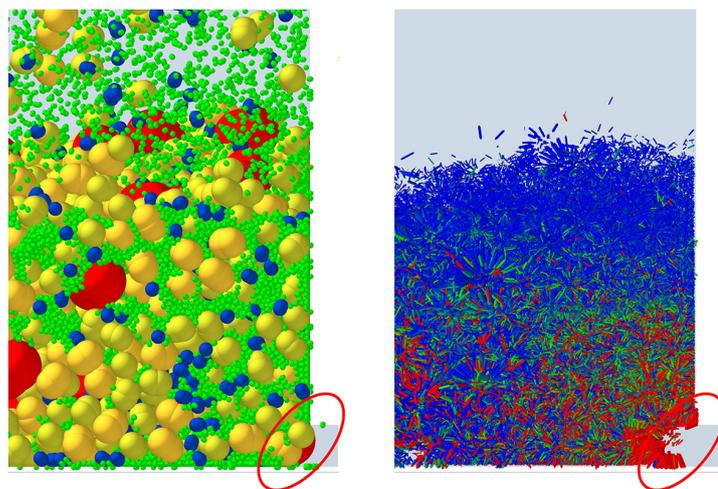


Figure 7. Particles bridging the opening in the punching screen unit
图 7. 颗粒在冲缝单元开口架桥

2) 颗粒成功架桥。由于沙粒之间的相互作用,在冲缝单元的开口处架桥后造成堵塞,但开口处的部分小直径沙粒可以通过,如图7中红色圆圈所示。两个颗粒在开口处形成桥架结构,导致堵塞。力链结构如图7(右)所示。

5. 结论

1) 冲缝单元堵塞过程总体上分为开始堵塞,堵塞加剧,堵塞平衡三个阶段,各个阶段分别对应冲缝单元出入口压差变化规律为开始缓慢增加、快速增加、逐渐变缓。对应渗透率变化规律为开始短时间缓慢降低、快速降低、逐渐变缓直至不再变化。

2) 在堵塞开始时,冲缝单元内部较粗颗粒难以突破缝口并滞留在冲缝单元内部,形成稀松的桥架结构,具有一定的挡砂作用,此时过砂率较高。

3) 在堵塞加剧阶段,颗粒不断累积,过流空间减小,较小颗粒逐渐填充较大颗粒形成的桥架孔喉结构,形成砂团结构,且砂团结构不断发展,呈现由缝口两端向冲缝单元中心发展趋势,直至成为完整的砂桥。

4) 在堵塞平衡阶段,完整砂桥达到一定厚度后成为新的挡砂层;堵塞呈现分层现象,细粉砂不断沉积,在缝口粗组分桥架结构后方形成两条完整的挡砂层,拥有更小的孔喉结构,以阻挡更小的颗粒。

5) 冲缝单元有两种挡砂形式,即大颗粒卡死缝口挡砂以及缝口砂粒架桥挡砂。

参考文献

- [1] 李明. 防砂管冲缝型保护壳结构参数优化[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国石油大学(北京), 2019.
- [2] 夏汉玲, 麻惠杰. 精密冲缝筛管防砂工艺在庄海 8Es-L4 的应用[J]. 化工管理, 2016(6): 15.
- [3] 尹彪, 邓福成, 沈雪峰, 陈胜宏, 文敏. 冲缝筛管结垢速率模拟研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2021, 17(9): 120-125.
- [4] 董长银, 高凯歌, 周崇, 智勤功, 李怀文, 张清华. 防砂井挡砂介质堵塞规律实验及堵塞程度定量预测模型[J]. 实验力学, 2017, 32(3): 351-360.
- [5] 董长银, 周博, 宋洋, 刘晨枫, 邓君宇. 天然气水合物储层防砂介质挡砂模拟试验与评价方法[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2020, 44(5): 79-88.
- [6] 邓福成, 林海, 曹砚锋, 潘豪, 闫伟. 微颗粒成分对金属网布筛管的堵塞机理实验研究[J]. 石油科学通报, 2017, 2(4): 500-506.
- [7] Kuang, S.B., Zhou, M.M. and Yu, A.B. (2020) CFD-DEM Modelling and Simulation of Pneumatic Conveying: A Review. *Powder Technology*, **365**, 186-207. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.02.011>
- [8] 冯永存, 马成云, 楚明明, 钟毅, 邓金根. 刚性颗粒封堵裂缝地层漏失机制数值模拟[J]. 天然气工业, 2021, 41(7): 93-100.
- [9] Xu, B.H. and Yu, A.B. (1997) Numerical Simulation of the Gas-Solid Flow in a Fluidized Bed by Combining Discrete Particle Method with Computational Fluid Dynamics. *Chemical Engineering Science*, **52**, 2785-2809. [https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(97\)00081-X](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(97)00081-X)
- [10] 李文庆, 王君傲, 段旭, 俎红叶, 刘浩田, 姚海元, 史博会, 宫敬. 基于 CFD-DEM 耦合方法的水合物堵塞模拟[J]. 油气储运, 2020, 39(12): 1379-1385.
- [11] Ismail, N.I., Shibo Kuang, S.B. and Yu, A.B. (2020) CFD-DEM Study of Particle-Fluid Flow and Retention Performance of Sand Screen. *Powder Technology*, **378**, 410-420. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.10.012>
- [12] Zhang, Z. (2017) An Advanced Sand Control Technology for Heavy Oil Reservoirs. University of Calgary, Calgary.
- [13] 李伟一, 钱建固, 尹振宇, 周闯. 间断级配砂土渗流侵蚀现象的计算流体力学 - 离散元耦合模拟[J]. 岩土力学, 2021, 42(11): 3191-3201.
- [14] 冯永存, 马成云, 楚明明, 钟毅, 邓金根. 刚性颗粒封堵裂缝地层漏失机制数值模拟[J]. 天然气工业, 2021, 41(7): 93-100.
- [15] Xu, S.L., Sun, H.L., Cai, Y.Q. and Geng, X.Y. (2020) Studying the Orifice Jamming of a Polydispersed Particle Sys-

-
- tem via Coupled CFD-DEM Simulations. *Powder Technology*, **368**, 308-322.
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.01.003>
- [16] Song, Y.Q., Ranjith, P.G., Wu, B.L. and Song, Z.L. (2021) A Microscopic Study of Sand Arches and Sand Skeletons under Hydrodynamic Force Based on the CFD-DE Model. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, **92**, Article ID: 104017. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2021.104017>
- [17] Shaffee, S.N., Luckham, P.F., Matar, O.K., Karnik, A. and Zamberi, M.S. (2019) Numerical Investigation of Sand-Screen Performance in the Presence of Adhesive Effects for Enhanced Sand Control. *SPE Journal*, **24**, 2195-2208.
<https://doi.org/10.2118/195686-PA>
- [18] Zhou, M.M., Wang, S., Kuang, S.B., Luo, K., Fan, J.R. and Yu, A.B. (2019) CFD-DE Modelling of Hydraulic Conveying of Solid Particles in a Vertical Pipe. *Powder Technology*, **354**, 893-905.
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.07.015>
- [19] 董长银, 钟奕昕, 武延鑫, 周玉刚, 曾思睿, 闫切海. 水合物储层高泥质细粉砂筛管挡砂机制及控砂可行性评价试验[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2018, 42(6): 79-87.
- [20] Ahad, N.A., Jami, M. and Tyson, S. (2020) A Review of Experimental Studies on Sand Screen Selection for Unconsolidated Sandstone Reservoirs. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, **10**, 1675-1688.
<https://doi.org/10.1007/s13202-019-00826-y>