

CFD-DEM 耦合的干热岩人工裂隙内暂堵剂运移规律研究

秦浩¹, 汪道兵^{1*}, 杨凯², 张绍良³, 孙东亮¹, 宇波¹

1 北京石油化工学院机械工程学院, 北京 102617

2 中国石油大学(北京)非常规油气科学技术研究院, 北京 102249

3 清华大学体育部运动表现与数据科学实验室, 北京 100084

*通信作者, upcwdb@bupt.edu.cn.

收稿日期: 2020-09-22

国家自然科学基金项目(No.51936001)和北京市自然科学基金项目(No. 3222030)联合资助

摘要 暂堵转向压裂技术是提高干热岩采热能力的最具潜力技术之一, 现有的针对暂堵剂在裂隙内运移过程的数值模拟研究模型相对简化, 难以对暂堵剂在裂隙内复杂流动过程进行精准的刻画, 无法捕捉颗粒在裂隙内的真实运动及其相互作用。为了准确捕捉暂堵剂在干热岩人工裂隙内的运移规律及颗粒间相互作用机理, 本文对裂隙内的颗粒运动和流体流动采用基于欧拉—拉格朗日的描述方法, 通过计算流体力学(CFD)与离散元(DEM)双向耦合的计算方法, 建立了颗粒型暂堵剂在人工裂隙内运移过程的CFD-DEM耦合模型。数值模拟结果表明, 影响干热岩人工裂隙中暂堵剂运移规律的主要因素包括: 携带液黏度、暂堵剂质量浓度、携带液流动状态和颗粒间摩擦系数等, 其中颗粒间摩擦系数对裂隙内颗粒间相互作用力影响相对较小, 颗粒间因摩擦产生的作用力相对较小, 难以克服流体流动对颗粒速度的影响。携带液黏度由 0.03 mPa·s 提升至 120 mPa·s 的过程中, 暂堵剂在缝内的平均运动速度降低超过 77%, 随黏度增大, 暂堵剂颗粒在裂隙内运动速度增幅逐渐降低, 出口处颗粒速度及携带液流量明显减小; 随暂堵剂质量浓度增大, 颗粒间相互作用力不断增大, 暂堵剂运动达到相对稳定的状态后, 颗粒质量浓度增大一倍, 颗粒间的相互作用力增大超过 43.8%; 当裂隙内携带液出现局部滞流现象时, 暂堵剂颗粒运动速度与颗粒间相互作用力明显发生变化, 颗粒间相互作用力较正常流动情况下增大超过 150 倍。本论文的研究成果对指导干热岩暂堵转向压裂的暂堵剂用量优化具有重要理论及指导意义。

关键词 干热岩; 暂堵转向压裂; CFD-DEM 耦合; 暂堵剂运移; 颗粒间相互作用

Investigation into the migration characteristics of temporary diverting agent in hydraulic fracturing of hot dry rock based on CFD-DEM coupling

QIN Hao¹, WANG Daobing¹, YANG Kai², ZHANG Shaoliang³, SUN Dongliang¹, YU Bo¹

1 School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing 102617, China

2 Research Institute of Unconventional Oil and Gas Science and Technology, China University of Petroleum-Beijing, Beijing

引用格式: 秦浩, 汪道兵, 杨凯, 张绍良, 孙东亮, 宇波. CFD-DEM耦合的干热岩人工裂隙内暂堵剂运移规律研究. 石油科学通报, 2021, 02: 81-92
QIN Hao, WANG Daobing, YANG Kai, ZHANG Shaoliang, SUN Dongliang, YU Bo. Investigation into the migration characteristics of temporary diverting agent in hydraulic fracturing of hot dry rock based on CFD-DEM coupling. Petroleum Science Bulletin, 2022, 01: 81-92. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2022.01.008

102249, China

3 Division of Sports Science and Physical Activity, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract Temporary plugging reorientation fracturing is one of the most promising technologies to improve the heat mining of hot dry rock. The existing numerical simulation model for the migration process of temporary plugging agent in fractures is relatively simplified, and it is difficult to accurately describe the complex flow process of a temporary plugging agent in fractures, and to capture the real movement and interaction of particles in the fracture. In order to accurately understand the migration regularity and the interaction mechanism between particles of temporary diverting agents in the hydraulic fractures of hot dry rock, the particle movement and fluid flow in the fracture are described by the Euler-Lagrange approach, through the bidirectional coupling of computational fluid dynamics (CFD) and the discrete element method (DEM), the CFD-DEM coupling model of particulate temporary diverting agents transportation in hydraulic fractures is established. Numerical results demonstrate that the main factors affecting the understanding of temporary diverting agent migration in hydraulic fractures of hot dry rock are: the carrier fluid viscosity, temporary diverting agent mass concentration, the flow state of the carrier fluid and the friction coefficient between particles. However, the friction coefficient between particles has less influence on the interparticle interaction force in the hydraulic fracture. The friction force between particles is relatively small and it is difficult to overcome the influence of fluid flow on particle velocity. During the process of increasing the carrier fluid viscosity from 0.03 mPa·s to 120 mPa·s, the average velocity of the temporary diverting agents in the hydraulic fracture decreased by more than 77%. With the increase of viscosity, the increase of velocity of temporary plugging agent particles in cracks decreases gradually, and the velocity of particles at the exit and fluid flow rate decrease significantly. With an increase of the mass concentration of temporary plugging agent, the interaction force between particles increases continuously. When the transport of the temporary diverting agent reached a relatively stable state, the mass concentration doubled and, the interaction force between the particles increased by more than 44%. When the carrying fluid in the fracture shows local turbulence, the velocity of the particles and the interaction force between the particles change significantly, and the interaction between the particles increases more than 150 times compared with the normal flow condition. The research results of this paper have important theoretical and instructive significance for guiding the optimization of the dosage of temporary diverting agents.

Keywords hot dry rock; temporary plugging and diverting fracturing; CFD-DEM coupling; temporary diverting agent migration; interaction between the particles

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2022.01.008

干热岩作为一种新兴的清洁可再生能源,可在不受环境气候制约的条件下,广泛用于发电、供暖等领域^[1-2]。现阶段干热岩地热能开发技术的关键在于通过水力压裂技术人工造缝在地下形成人工热交换系统,然而由于干热岩埋藏很深,基岩温度较高且地应力各向异性较强,岩石塑性特征增强,常规水力压裂技术形成的人工裂隙结构较为单一,地下换热面积不充分而导致采热效率不理想。为了解决以上难题,通过向已有的人工裂隙内加入暂堵剂对裂隙实施临时封堵,逼迫裂隙转向形成多条新裂隙,提升缝网复杂程度的暂堵转向压裂技术成为提高干热岩采热能力的最具潜力技术之一^[3-6]。因此,研究和掌握暂堵剂在干热岩人工裂隙内的运移规律是干热岩暂堵转向压裂成败的关键所在。

暂堵剂在干热岩人工裂隙内的运移过程为典型的固液两相流动过程,涉及到颗粒运移、聚集及相互碰撞等复杂物理过程,目前的实验研究因受实验条件限制难以对暂堵剂在裂隙的这一复杂流动过程进行精准的刻画。Zhang等借助基于3D打印技术重现的裂隙

模型,研究了纤维长度、浓度、注入速度等对暂堵过程的影响,然而实验过程中无法观察暂堵剂缝内运移过程^[7]。为了实现观察裂隙中的纤维和颗粒暂堵剂的动态封堵过程,相关学者开发了配有高速摄像机的暂堵实验系统,但该系统无法实现高压阻力,难以获得真实工况的暂堵剂流动状态^[8]。因此,数值模拟是研究暂堵剂在人工裂隙内的运移规律的有效方法,相比实验成本也较为低廉。目前针对两相流的数值模拟方法主要包括欧拉-欧拉法和欧拉-拉格朗日法两类^[9]。欧拉-欧拉法在计算颗粒-流体两相流过程中将颗粒作为拟流体与真实流体共同占据流体单元空间,计算量相对欧拉-拉格朗日法较小,计算过程中可不受颗粒数量的限制,但基于欧拉-欧拉方法的模型用来模拟裂隙内流体中颗粒的运移机制,因颗粒拟流体化处理造成关键颗粒信息丢失,无法真实捕捉颗粒在裂隙内的真实运动及其间相互作用^[10-12]。在欧拉-拉格朗日法中,将固体颗粒视为离散相,颗粒离散相计算采用离散单元法,颗粒占据流体体积真实体现颗粒特性,并且具有丰富的接触力模型,可精确捕捉暂堵剂在干

热岩人工裂隙内的运动及颗粒间相互作用过程；同时，将流体视为连续相，计算采用Navier-Stokes方程求解，过程中考虑颗粒与流体间相互作用。目前应用欧拉-拉格朗日法研究暂堵剂在人工裂隙中的运移过程尚处于探索阶段，仅有少量学者如Dahi Taleghani等，但其采用的接触模型较为简单，难以刻画颗粒间的相互作用过程，且针对颗粒间相互作用力对运移过程的影响研究相对较少^[13-16]。

基以上述分析，本文通过欧拉-拉格朗日描述体系，即流体流动采用欧拉方法计算，颗粒运动通过拉格朗日方法追踪，建立模拟暂堵剂颗粒在干热岩人工裂隙内运移过程的CFD-DEM双向耦合计算模型，该耦合算法可精准捕捉暂堵剂在裂隙内运移过程中的位置、运动速度、接触力及其他相互作用力等信息，分析暂堵剂携带液黏度、颗粒间摩擦系数、暂堵剂质量浓度以及携带液流动状态对于暂堵剂缝内运移过程的影响。本论文的研究成果对指导干热岩暂堵转向压裂的暂堵剂用量优化具有重要理论及指导意义。

1 物理模型

由于CFD-DEM计算量巨大，为不失一般性，本文采用了小尺度的人工裂隙表征单元来模拟颗粒型暂堵剂在人工裂隙内的运移过程，如图1所示，裂隙长度和高度分别为200 mm和50 mm，入口和出口处的裂隙宽度分别为1 mm和0.5 mm。为了保证CFD-DEM耦合计算结果的准确性和收敛性，将裂隙几何模型划分为长、宽（入口/出口）、高单元长度为1 mm×0.25 mm/0.125 mm×0.5 mm的六面体网格单元，共有80 000个网格节点。

本模型假设裂隙内的流体为不可压缩牛顿流体，在裂隙入口与出口处的边界条件均为恒定压力条件，裂隙入口压力和出口压力分别为30 MPa和29 MPa。裂隙壁面为无滑移边界，即假设暂堵剂流体在裂隙壁面处的速度为零。

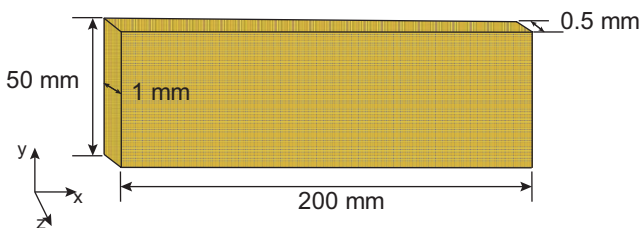


图1 裂隙网格划分

Fig. 1 Fracture meshing

2 数学模型

2.1 流体流动控制方程

控制单元体的流动满足质量守恒和动量守恒，不可压缩流体流动分别满足流体力学的连续性方程和Navier-Stokes方程，具体表达式如下^[17]：

$$\frac{\partial(\rho_f \varepsilon_f)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f \varepsilon_f \mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho_f \varepsilon_f \mathbf{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f \varepsilon_f \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\varepsilon_f \nabla p - \varepsilon_f \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}_f - \vec{F}^A + \rho_f \varepsilon_f \mathbf{g} \quad (2)$$

式中： ε_f 为流体相体积分率； ρ_f 为流体密度，kg/m³； \mathbf{u} 为流体速度，m/s； $\boldsymbol{\tau}_f$ 为流体剪切应力，N/m²； p 为流体压力，Pa； \mathbf{g} 为重力加速度，m/s²； \vec{F}^A 为体积流体-颗粒相互作用力，即周围流体作用于粒子的体积力，N/m³。

2.2 颗粒运动控制方程

作为一种典型的拉格朗日方法，离散元法主要根据牛顿第二定律来描述颗粒的运动速度、加速度及颗粒间相互作用力等，跟踪粒子的转动和平动的控制方程分别为^[18]：

$$m_i \frac{d\vec{v}_i}{dt} = \vec{f}_{i,n} + \vec{f}_{i,t} + \vec{f}_{i,f} + \vec{f}_{i,b} \quad (3)$$

$$I_i \frac{d\vec{\omega}_i}{dt} = r_{i,c} \times \vec{f}_{i,t} + \vec{T}_{i,r} \quad (4)$$

式中： $\vec{f}_{i,n}$ 为颗粒-颗粒法向接触力，N； $\vec{f}_{i,t}$ 为颗粒-颗粒切向接触力，N； $\vec{f}_{i,f}$ 为流体-颗粒相互作用力，N； $\vec{f}_{i,b}$ 为体积力，包括重力、磁力等，N； $\vec{T}_{i,r}$ 为流体作用在颗粒上的转矩，N·m； $r_{i,c}$ 为颗粒接触力作用半径，m。

2.3 颗粒-颗粒间相互作用力

为了描述颗粒间的法向接触力和切向接触力，需要定义颗粒间相互作用的接触模型，在本研究中采用经典的Hertz-Mindlin接触模型。如图2所示，半径为 R_i 和 R_j 的颗粒 i 与颗粒 j 相互接触，其位置向量分别为 \vec{x}_i 与 \vec{x}_j 。当两颗粒的法向重叠量 $\delta_n > 0$ 时，颗粒间存在接触，接触产生碰撞力 f_{ij}^c ，分别由法向碰撞力 f_{ij}^n 与切向碰撞力 f_{ij}^t 组成：

$$\vec{f}_{ij}^c = \vec{f}_{ij}^n + \vec{f}_{ij}^t \quad (5)$$

计算颗粒间法向碰撞力与切向接触力采用Cundall和Strack提出的线弹性阻尼器(the linear spring-dashpot, LSD)模型^[13],该模型适用于多颗粒接触碰撞是最常用的粘弹性力-位移模型^[19-20]。在LSD模型中法向碰撞力 \vec{f}_{ij}^n 是由法向弹性力 \vec{f}_{cl}^n 与法向黏滯力 \vec{f}_{diss}^n 组成。其中弹性力由胡克定律计算,在计算过程中节约了碰撞动能。而粘滯力与颗粒的相对运动速度成正比,计算过程中产生了碰撞动能耗散。因此,法向碰撞力定义为:

$$\vec{f}_{ij}^n = \vec{f}_{cl}^n + \vec{f}_{diss}^n = -(k_n \delta_n) \vec{n}_{ij} - (\eta_n v_m) \vec{n}_{ij} \quad (6)$$

式中: k_n 为法向弹性刚度因子; η_n 为法向阻尼系数; v_m 为法向相对速度。

同样,切向碰撞力是由切向弹性力与切向黏滯力组成,计算过程中假设在具有恒定切向弹性刚度的碰撞颗粒接触区域没有微滑移,将切向碰撞力定义为:

$$\vec{f}_{ij}^t = \vec{f}_{cl}^t + \vec{f}_{diss}^t = -(k_t \delta_t) \vec{t}_{ij} - (\eta_t v_n) \vec{t}_{ij} \quad (7)$$

式中: k_t 为切向弹性刚度因子; η_t 为切向阻尼系数; v_n 为切向相对速度。

2.4 CFD-DEM耦合策略

由于颗粒在裂隙内的运动方式与流体流动过程二者相互影响,因此本文采用流体流动与颗粒运动的双向耦合算法对固液两相模型进行精准求解计算。如图3所示,为CFD-DEM耦合算法的程序流程图,

主要包括耦合计算,DEM循环计算以及CFD计算3个模块。计算开始前首先对耦合计算模块、DEM模块及CFD模块进行初始化;模型参数初始化后进入耦合计算模块,根据颗粒位置和流体网格信息计算每个流体单元孔隙度,并通过颗粒速度、流体压力及速度等得到每个流体单元中的流体-颗粒相互作用力;然后,将耦合计算模块的数据传递给DEM循环计算模块,通过DEM模块循环计算后得到下一个流体时间步长中所有粒子的新位置、平动速度和转动速度;最后,将DEM计算结果传递给CFD计算模块,求解流体相质量方程、动量方程,从而得到流体的速度场与压力场。判断是否达到计算时间,若未完成则将计算所得流体及颗粒数据传递至耦合模块进行下一循环计算;若完成计算,则输出最终计算结果。

为了确保上述CFD与DEM双向耦合同步进行和数值解的交换,在DEM循环计算中迭代次数 m 为流体相计算时间步长 Δt_f 与颗粒相计算时间步长 Δt_p 的应满足如下比值关系式:

$$m = \frac{\Delta t_f}{\Delta t_p} \quad (8)$$

3 模型验证

为了验证本文中模型解的可靠性,将本文获得的数值模拟所得到的出口流量变化的数据与文献[14]中的结果进行对比,参考文献中模型数据如下

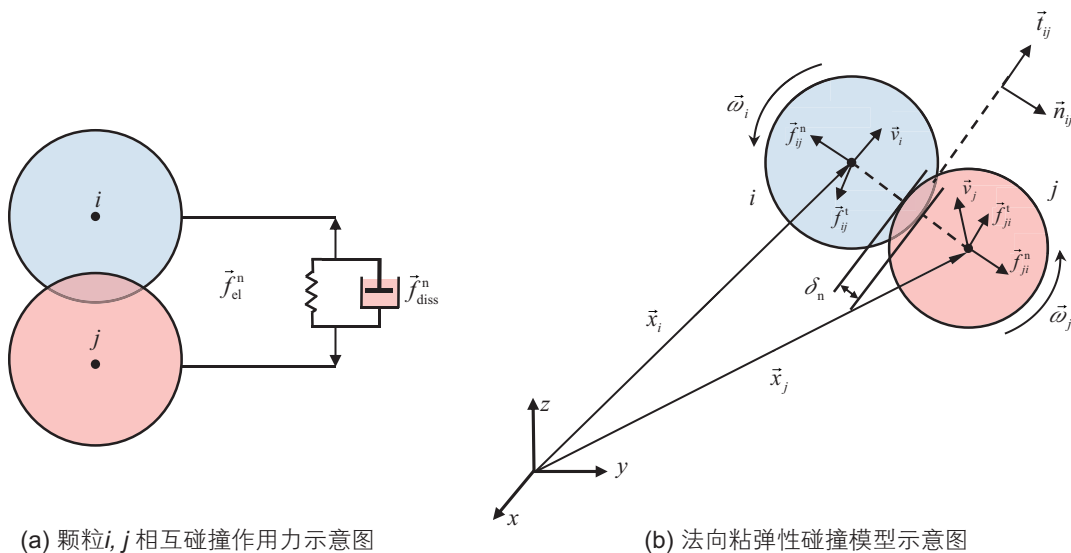


图2 颗粒*i, j*相互碰撞作用力示意图

Fig. 2 Schematic diagram of collision force between particles *i* and *j*

表 1 参考文献相关属性

Table 1 References related attributes

流体密度/(kg/m ³)	流体黏度/mPa·s	颗粒直径/mm	颗粒密度/(kg/m ³)	入口压力/KPa
200	60	0.5	2500	875
出口压力/KPa	弹性模量/GPa	泊松比	摩擦系数	恢复系数
0	1	0.3	0.6	0.5

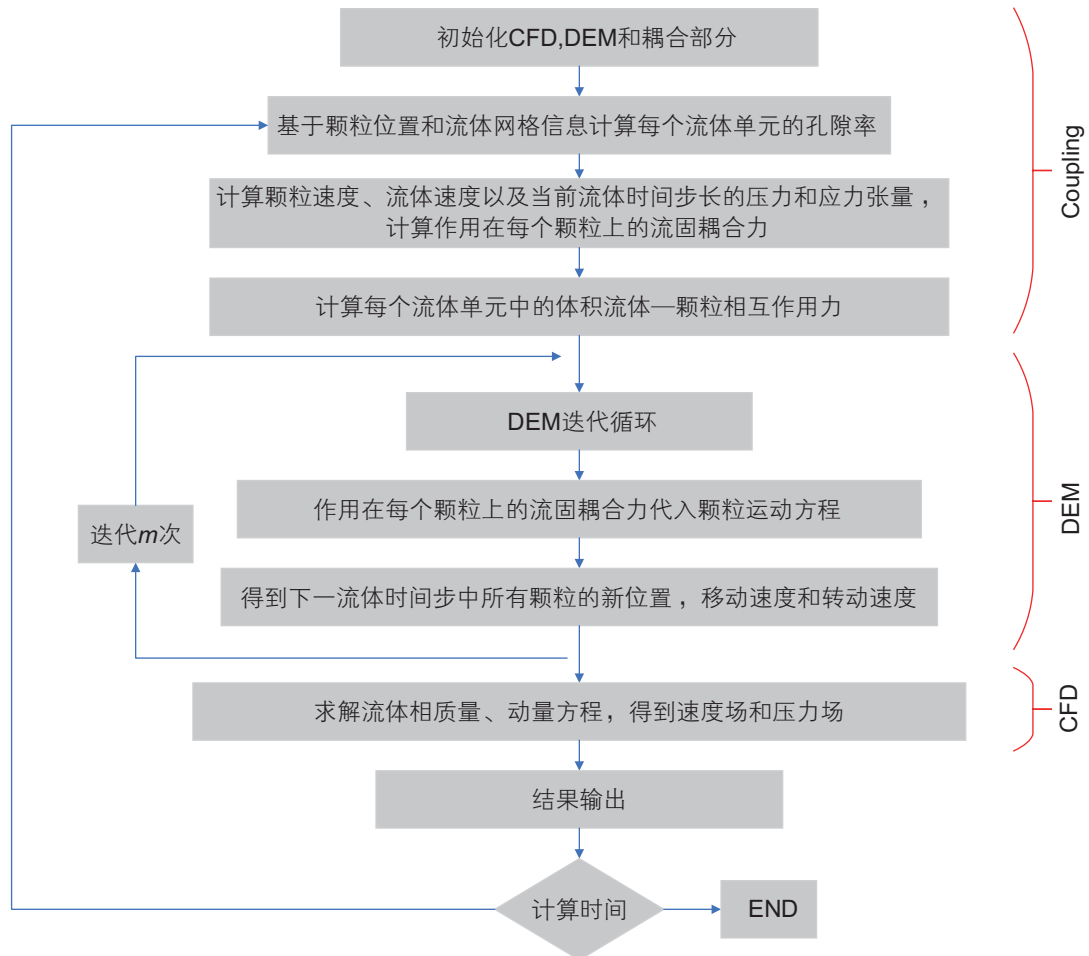


图 3 CFD-DEM耦合总体框架

Fig. 3 The overall framework for CFD-DEM coupling

表 1 所示，其中文献中数据包括暂堵前和暂堵后两部分。通过图 4 中数据对比可以看出， V_{inj}/V_{frac} 小于 0.1 的范围内，参考数据与数值模拟中出口流量基本相同，最大误差小于 4.6%，而当 V_{inj}/V_{frac} 大于 0.1 后文献中模拟裂缝内堵剂颗粒逐渐出现粘结局部封堵，使得出口流量明显小于本文模拟结果，但两者总体变化趋势基本相同。为了进一步验证模型的可靠性，本文通过该模型根据文献 [15] 中支撑剂颗粒在裂缝内的运移及沉积实验过程构建了相应的数值模型，如图 5 所示为颗粒运移过程后期，颗粒沉积及分布

数值模拟结果与实验结果对比，对比结果表明，数值模拟结果与实验中颗粒分布结果基本吻合。综上所述，数值模型模拟结果可靠，可用作模拟暂堵剂颗粒在干热岩人工裂缝内的运移过程。

4 数值模拟方案及结果分析

4.1 数值模拟方案

本文针对暂堵剂携带液黏度、颗粒间摩擦系数、

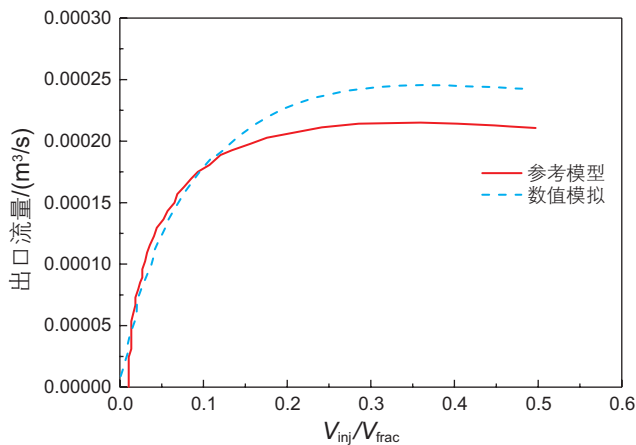


图4 数值模拟结果与参考模型出口流量对比图

Fig. 4 The comparison of the numerical simulation results with the reference model

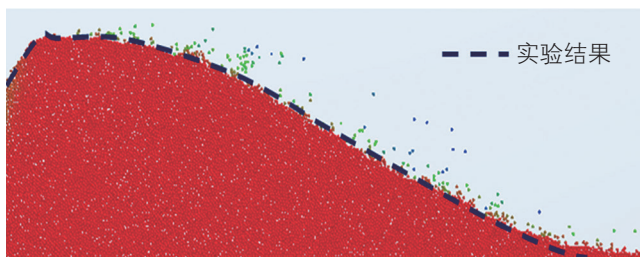


图5 颗粒沉积及分布数值模拟结果与实验结果对比图

Fig. 5 The Comparison of numerical simulation results and experimental results of particle deposition and distribution

暂堵剂质量浓度等因素对于暂堵剂运移过程的影响,开展了相关的数值模拟研究。首先对暂堵剂携带液黏度分别在 0.03 mPa·s、30 mPa·s、60 mPa·s、90 mPa·s 及 120 mPa·s 条件下的暂堵剂运移过程进

行分析;随后通过对静摩擦系数及滚动摩擦系数分别为 1/0.5、0.8/0.4、0.6/0.3、0.4/0.2 的情况下裂缝内暂堵剂颗粒间的相互作用进行研究,分析摩擦系数对运移过程的影响;通过对比暂堵剂颗粒质量浓度在 4%、5%、6%、7% 及 8% 条件下颗粒间相互作用力变化及颗粒运动状态,分析颗粒质量浓度对裂缝内暂堵剂输运过程的影响。最后对湍流作用下裂缝内暂堵剂颗粒运动及相互作用进行分析。其中暂堵剂颗粒、携带液具体参数及干热岩壁面相关参数如下表 2 所示。

由于雷诺数大于 4000,本模型采用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型。考虑到流体流动及颗粒运移时间会因流体性质、颗粒尺寸以及裂缝几何形状尺寸等因素的变化而产生急剧变化,为此我们采用无量纲时间对相关结果进行分析来避免其影响。定义特征时间 $\tau = \sqrt{d/g}$ 对计算时间进行无量纲化处理,其中 d 为颗粒直径, g 为重力加速度。为了确保 CFD 与 DEM 双向耦合同步进行和数值解的交换,本文在模拟中选用 CFD 时间步长为 5×10^{-5} s, DEM 时间步长为 2.5×10^{-6} s,每个流体时间步内,DEM 循环计算中迭代 20 次。

4.2 结果分析

干热岩人工裂隙内存在明显的干热岩壁面-携带液流体-暂堵剂颗粒间换热过程。如图 6 所示为干热岩壁面温度为 473 K 时,裂隙内携带液流体与壁面换热后缝内流体温度分布及暂堵剂颗粒在与携带液流体换热后颗粒温度分布。缝内携带液流体在与干热岩壁面换热后温度逐渐提升,但由于换热距离较小,导致

表 2 相关属性

Table 2 The relevant properties

(a) 携带液相关参数

流体黏度/mPa·s	流体密度/(kg/m ³)	入口压力/MPa	出口压力/MPa	湍流模型	重力作用
30	1000	30	29	RNG $k-\varepsilon$	Y轴负方向

(b) 暂堵剂颗粒相关参数

颗粒直径/mm	颗粒密度/(kg/m ³)	泊松比	弹性模量/GPa	颗粒流速/(m/s)
0.4	2500	0.3	1	1.2
导热系数 W/(m·K)	颗粒质量浓度	恢复系数	静摩擦系数	滚动摩擦系数
0.2	6%	0.5	0.8	0.2

(c) 干热岩相关参数

壁面温度/K	导热系数 W/(m·K)	岩石密度/(kg/m ³)	弹性模量/GPa	泊松比
473	2.6	2650	45	0.13

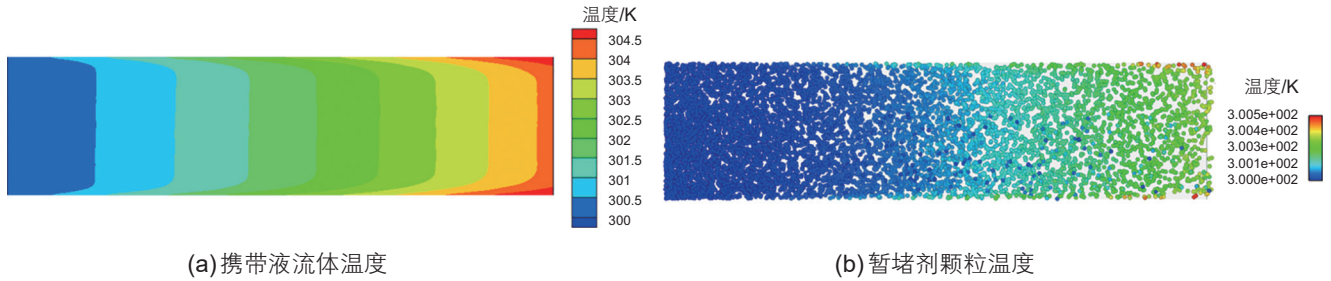


图 6 携带液流体及暂堵剂颗粒温度分布

Fig. 6 The Temperature distribution of carrying fluid and temporary plugging agent particles

出口处流体温度仅升高 4.5 °C；而缝内暂堵剂在受到流体温度及壁面温度共同作用后，温度也出现相应提升，同样因换热面积较短且暂堵剂导热系数相对较小，使得颗粒温度未出现较大幅度提升，仅为流体温度增大量的 11.1%。在该模型的基础上分别对带液黏度、暂堵剂质量浓度、携带液流动状态和颗粒间摩擦系数等因素对于干热岩人工裂隙内暂堵剂运移规律进行分析。

4.2.1 暂堵剂携带液黏度

图 7 为颗粒平均速度随暂堵剂携带液黏度变化图。从图中可以看出，随携带液黏度的增大，缝内暂堵剂颗粒平均运动速度逐渐减小；颗粒进入裂缝初期，受缝内流体作用，其平均速度迅速提升，当流体携带暂堵剂颗粒充满整个流域后，暂堵剂颗粒运动速度趋于稳定；当携带液黏度由 0.03 mPa·s 提升至 120 mPa·s 的过程中，暂堵剂在缝内的平均运动速度降低超过 77%。

为了进一步研究携带液黏度对于暂堵剂颗粒速度的具体影响，对暂堵剂稳定运动状态下携带液流速与暂堵剂颗粒运动进行分析。从图 8 中可以看出，当缝内流动趋于稳定，因裂缝形状及缝内携带液压力

变化影响，由入口至出口流动过程中，携带液流速不断上升。受缝内携带液流动的作用，暂堵剂颗粒在入口至出口运动过程中速度不断增大。随携带液黏度的变化，其颗粒速度变化幅度发生相应的减小。在黏度为 0.03 mPa·s 时，颗粒速度由入口时的 1.2 m/s 增大至 28.84 m/s 左右，速度增大超过 27 m/s；而当流体黏度增大至 30 mPa·s 时，出口处颗粒速度仅为 19.6 m/s 左右，增大 18.4 m/s 左右。同样，当黏度增大至 60 mPa·s、90 mPa·s 时，暂堵剂颗粒在出口处速度分别增大 12 m/s、8.5 m/s 左右；而当流体黏度为 120 mPa·s 时，出口处颗粒速度仅为 6.523 m/s。可以得出，随流体黏度的增大，暂堵剂颗粒在裂缝内流动的过程中，速度增幅将逐渐降低，出口处颗粒速度减小。

携带液黏度在影响暂堵剂颗粒运动的同时，对携带液的流动过程也存在一定的影响。如图 9 所示，出口流量由黏度为 0.03 mPa·s 时的 0.68 m³/s 下降至 120 mPa·s 时 0.14 m³/s 左右。出口流量随携带液黏度增大不断减小的主要原因是黏度增大造成裂缝内携带液流动阻力增大，流速明显下降，相同时间内通过裂缝出口流出的携带液总量减少。同时可以看出携带液黏度在 0.03 mPa·s、30 mPa·s 变化时裂缝出口流量在注入流体体积与裂缝体积之比 $V_{inj}/V_{frac}=2$ 附近达到峰值，而后保持相对稳定出口流量；但随着黏度逐渐增大，峰值区间不断向前推移，黏度在 60 mPa·s、90 mPa·s、120 mPa·s 时，出口流量峰值分别出现在 $V_{inj}/V_{frac}=1.5$ 、 $V_{inj}/V_{frac}=1.3$ 、 $V_{inj}/V_{frac}=1$ 。

4.2.2 颗粒间摩擦系数

暂堵剂颗粒在裂缝内随携带液运移的过程中，颗粒相互之间因接触而存在相互作用，颗粒与颗粒之间的相互作用主要受摩擦系数的影响，为了研究颗粒间摩擦系数对于颗粒型暂堵剂在裂缝内运移过程的影响，对不同暂堵剂质量浓度下的运移过程进行了分析。图 10(a) 中显示的是在暂堵剂质量浓度为 6% 时颗粒—颗

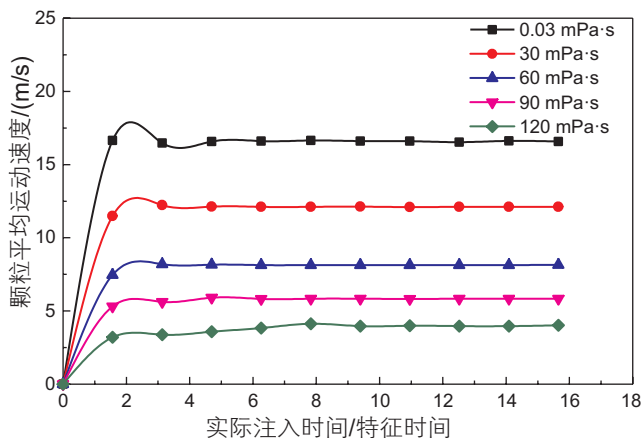


图 7 颗粒平均速度随携带液黏度变化图

Fig. 7 The diagram of average particle velocity changing with viscosity of carrier fluid

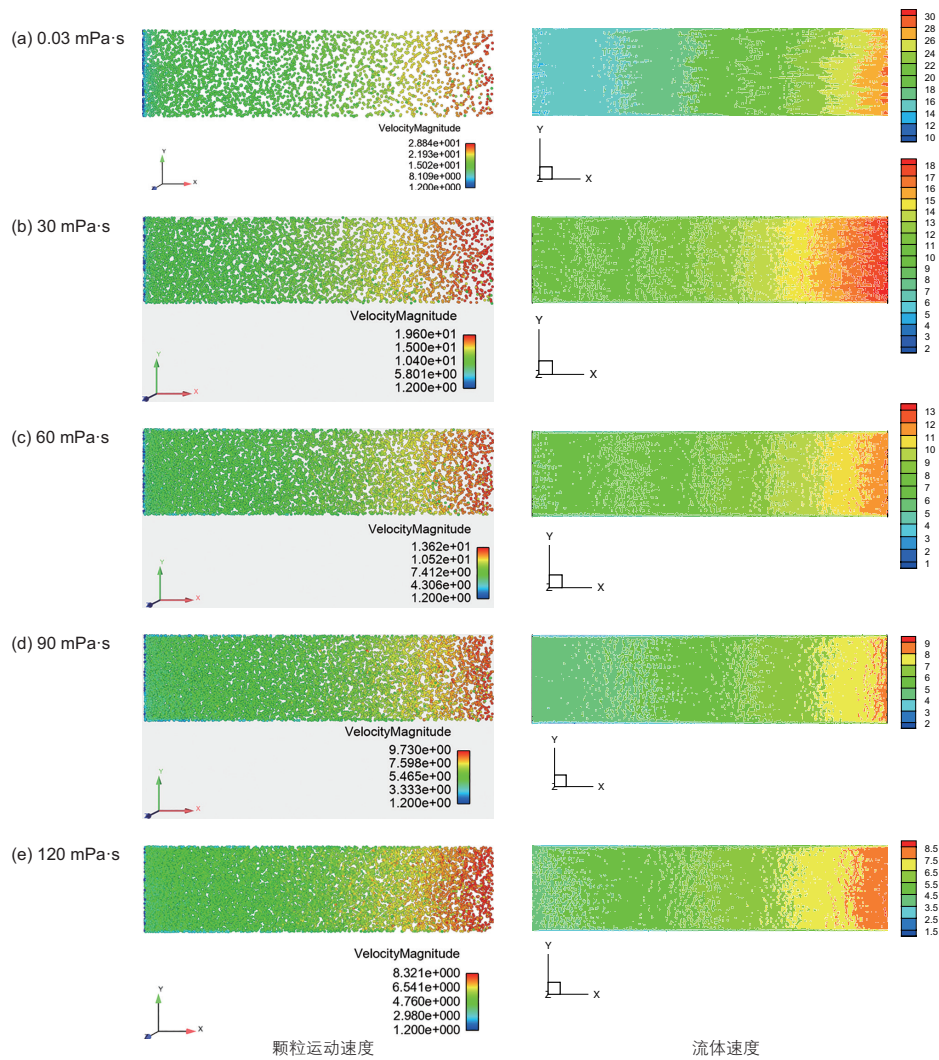


图 8 稳定运动状态下流体流速与暂堵剂颗粒运动速度云图

Fig. 8 The cloud diagram of fluid velocity and velocity of temporary plugging agent particles in stable motion state

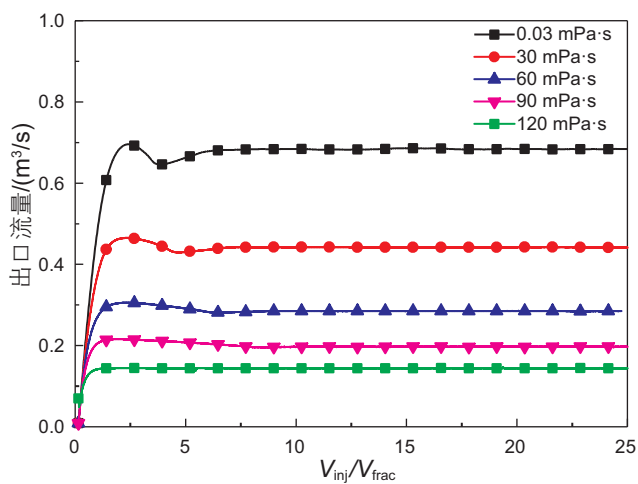


图 9 出口流量随注入流体体积与裂缝体积之比变化图

Fig. 9 The diagram of outlet flow rate as the ratio of injected fluid volume to fracture volume

粒间静/滚动摩擦系数分别为 1/0.5、0.8/0.4、0.6/0.3、0.4/0.2、0.2/0.05 情况下暂堵剂颗粒间相互作用力的变化, 从图中可以看出, 裂缝内颗粒处于稳定运动状态时静/滚动摩擦系数变化的过程中, 颗粒间相互作用力基本保持在 $1.4\sim 1.6\times 10^{-4}$ N, 说明颗粒—颗粒间摩擦系数对颗粒间相互作用力的影响较小。

为了进一步研究颗粒间摩擦系数对暂堵剂颗粒运动的影响, 对各静/滚动摩擦系数下颗粒平均运动速度进行分析, 如图 10(b) 颗粒平均运动速度结果表明在静/滚动摩擦系数由 1/0.5 减小至 0.2/0.05 的过程中, 裂缝内颗粒平均运动速度均保持在 5.8 m/s 左右, 变化较小。从图 11 中可以看出随着静/滚动摩擦系数的减小, 颗粒间相互作用力变化相对较小的同时, 裂缝内暂堵剂颗粒的角速度逐渐增大, 由 325 rad/s 左右提升

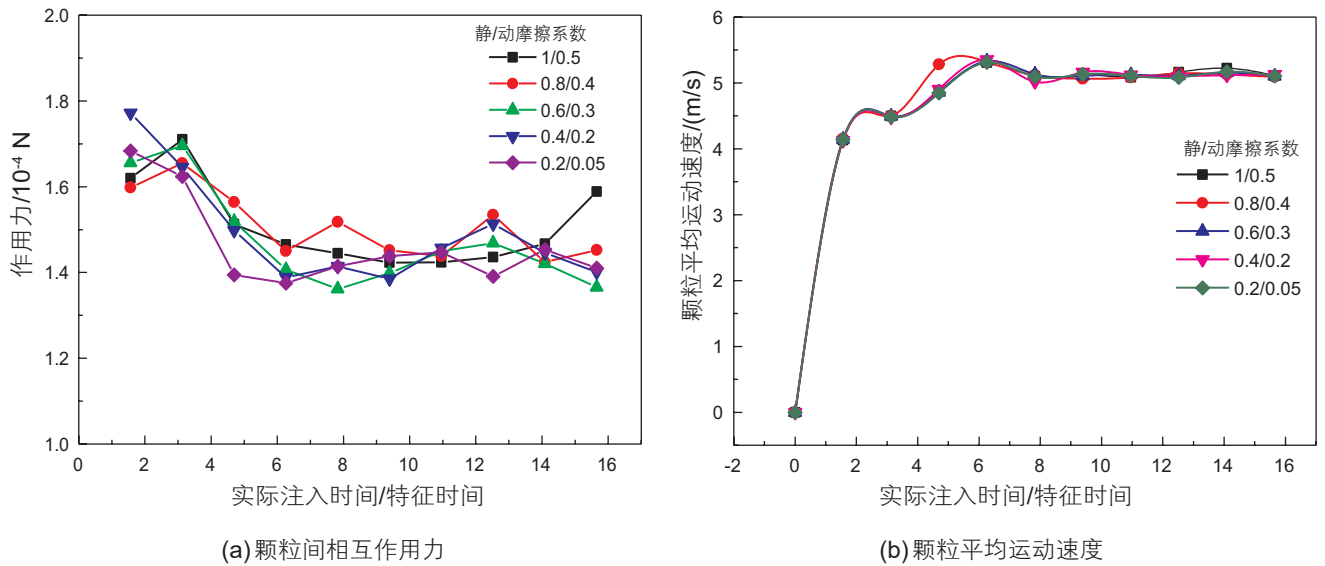


图 10 不同静/滚动摩擦系数下颗粒间相互作用力及颗粒平均运动速度图

Fig. 10 Interaction force and average velocity of particles under different static/rolling friction coefficients

至 600 rad/s 左右, 因为颗粒的角速度变化与颗粒间的滚动摩擦相关, 如式 9 所示, 角速度与滚动摩擦系数成反比。在相同的滚动摩擦力的作用下, 滚动摩擦系数越小, 其角速度则越大。

$$\tau = -\mu_r F_n R \omega \quad (9)$$

其中: μ_r 为滚动摩擦系数; R 为接触到质心的距离; F_n 为法向力; ω 为颗粒在接触点的单位角速度矢量。

通过上述分析可以看出, 颗粒间摩擦系数对暂堵剂颗粒在裂隙内运动速度的影响较小, 仅滚动摩擦系数较小时, 颗粒角速度发生改变, 但对裂隙全段内颗粒的运移过程并未产生影响, 因此颗粒间摩

擦系数对于裂隙内颗粒运动的影响较小。

4.2.3 暂堵剂质量浓度

图 12 显示的是 4%、5%、6%、7% 以及 8% 颗粒质量浓度下的运移过程中缝内颗粒作用力的变化, 从图中可以看出随着质量浓度的增大, 其作用力也将随之更大。暂堵剂最初进入裂隙入口时, 由于入口段裂隙宽度大, 暂堵剂颗粒初始速度相对较低, 颗粒无法快速向前运动, 出现前端堆积, 导致颗粒间的接触碰撞增加, 颗粒间相互作用力较大, 如图 13 所示, 随后暂堵剂颗粒不断随携带液向裂隙出口运动, 当 $t/\tau=3.5$ 后裂隙内暂堵剂颗粒随携带液运动充满整个裂隙, 达到较为稳定的运移状态; 与暂堵剂颗粒最初进入裂隙

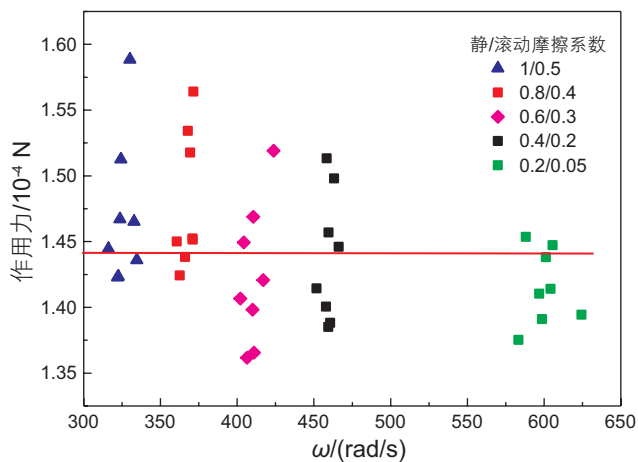


图 11 颗粒角速度与颗粒间相互作用力随摩擦系数变化图

Fig. 11 The diagram of angular velocity and interaction force of particles varying with friction coefficient

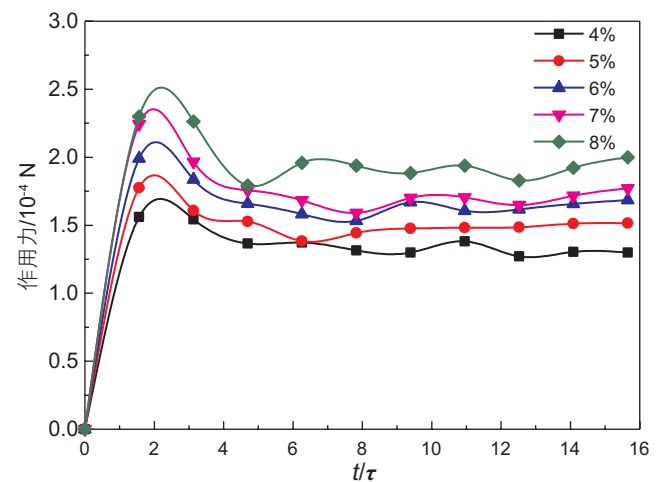


图 12 不同质量浓度下颗粒间相互作用力变化

Fig. 12 The interaction force between particles changes at different mass concentrations

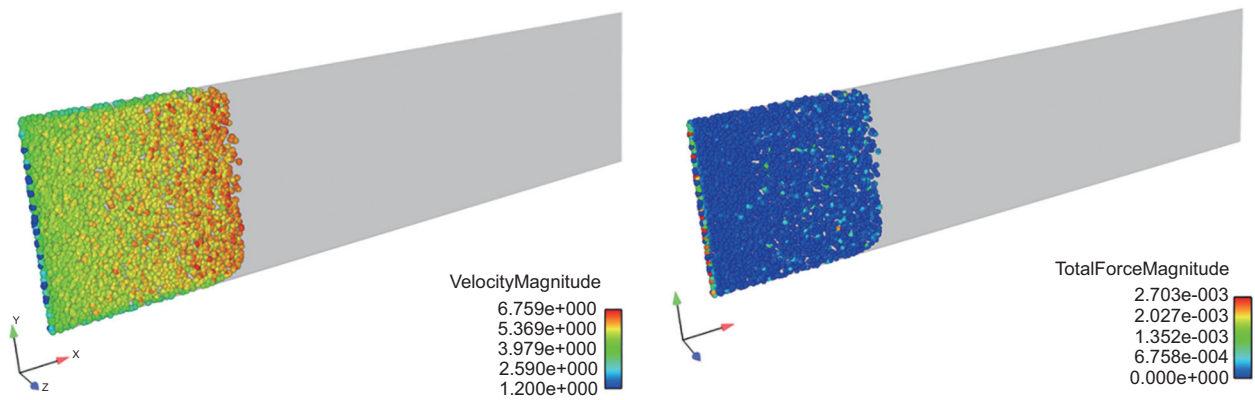


图 13 暂堵剂颗粒裂缝前端堆积颗粒运动速度与相互作用力

Fig. 13 The velocity and interaction force of the stacked particles at the front of the fracture of temporary plugging agent particles

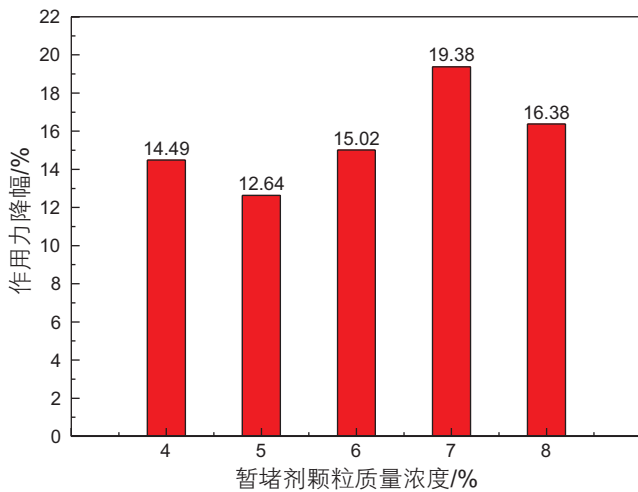


图 14 暂堵剂稳定运动状态下相互作用力降幅

Fig. 14 The decrease of interaction force under the stable movement of temporary plugging agent

阶段相比，暂堵剂达到稳定运动状态后，颗粒间相互作用力减小超过 12.64%。

暂堵剂颗粒质量浓度由 4% 增大至 8% 的过程中，缝内暂堵剂颗粒间相互作用力不断增大，当暂堵剂运动达到相对稳定的状态后，质量浓度增大一倍，颗粒间的相互作用力增大超过 43.8%，可以说明质量浓度对于暂堵剂缝内运移过程具有重要的影响。如图 15 所示，稳定运动状态下，暂堵剂质量浓度的增大，颗粒运动速度降低，颗粒间相互作用力增大，主要是由于质量浓度增大后，相同裂缝尺度内颗粒间相互接触碰撞增多，一定程度上减缓了颗粒运动速度，有助于后期暂堵剂在缝内的形成有效封堵。但过高的浓度会致

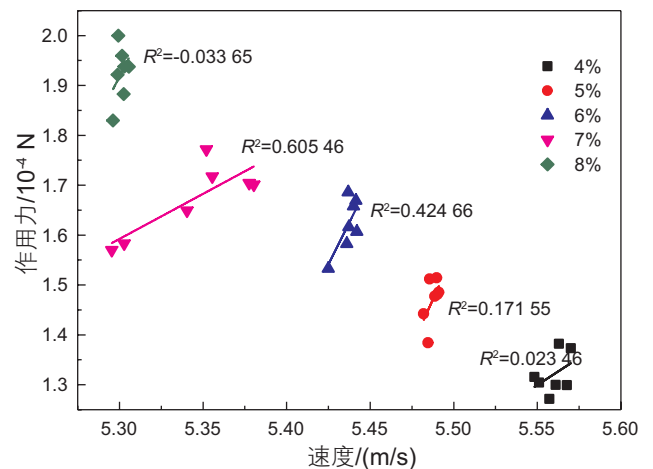


图 15 暂堵剂稳定运动状态下颗粒间相互作用力与运动速度的关系

Fig. 15 The relationship between particle interaction force and velocity under the stable movement of temporary plugging agent

使实际施工困难并带来材料的浪费，因此在实际施工过程中应根据实际的工况，确定相应的暂堵剂质量浓度。

4.2.4 携带液流动状态

携带液在裂缝内流动时易出现明显的湍流现象，与正常流动情况下相比，湍流区域内携带液流速、暂堵剂颗粒运动及颗粒间相互作用等方面产生较大变化。如图 16 所示，在红色圆圈内分别标注暂堵剂质量浓度为 6% 情况下，裂缝内局部区域出现湍流作用时，颗粒速度、湍流动能及颗粒间相互作用力的变化。与裂缝内正常流动区域相比，湍流区内湍流动能超过 $9.5 \text{ m}^2/\text{s}^2$ ，出现明显增大，局部区域湍

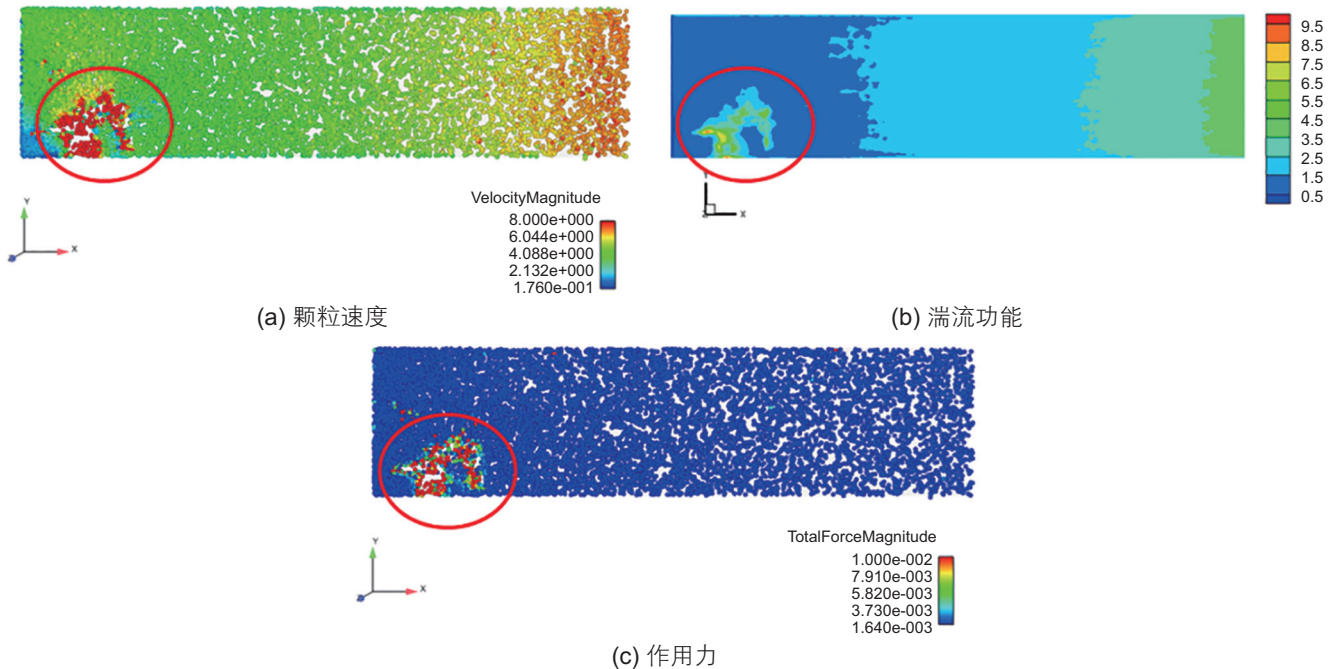


图 16 湍流情况下颗粒速度、携带液湍流动能及颗粒间相互作用力云图

Fig. 16 The cloud diagram of particle velocity, turbulent kinetic energy of carrying fluid and interaction force between particles in turbulent condition

流导致携带液流动速度的增大使得该区域内颗粒速度增大超过 50 倍。如图 16(c) 所示，湍流造成颗粒局部旋涡流动，造成大量颗粒间相互接触碰撞，出现颗粒间相互作用力突增，达到 1.29 N，较正常流动情况下增大超过 150 倍。由上述分析可以得出，在裂隙内携带液的流动方式对暂堵剂的运移过程具有较大的影响。

5 结论

(1) 本文建立了颗粒型暂堵剂在人工裂隙内运移过程的 CFD-DEM 耦合模型，数值模拟结果表明影响干热岩人工裂隙中暂堵剂颗粒运移的主要因素为暂堵剂携带液黏度、暂堵剂质量浓度以及携带液的流动状态。

(2) 颗粒间摩擦系数对运移过程中暂堵剂颗粒间相

互作用力及颗粒运动速度影响较小，分析造成这种现象的原因可能是颗粒间因摩擦产生的作用力相对较小，难以克服流体流动对颗粒速度的影响。

(3) 携带液黏度由 0.03 mPa·s 提升至 120 mPa·s 的过程中，暂堵剂在缝内的平均运动速度降低超过 77%。携带液黏度增大，暂堵剂颗粒在裂隙内运动速度增幅逐渐降低，出口处颗粒速度及携带液流量明显减小。

(4) 随暂堵剂质量浓度的增大，颗粒间相互作用力不断增大，暂堵剂运动达到相对稳定的状态后，颗粒质量浓度增大一倍，颗粒间的相互作用力增大超过 43.8%。当裂隙内携带液出现局部湍流现象时，暂堵剂颗粒运动速度与颗粒间相互作用力明显发生变化，颗粒间相互作用力较正常流动情况下增大超过 150 倍。

参考文献

- [1] 陈雄. 地球物理方法在干热岩勘查中的应用研究[D]. 博士学位论文, 吉林大学, 2016. CHEN X. Research on the application of geophysical methods in hot dry rock prospecting[D]. Doctoral dissertation, Jilin University, 2016.
- [2] 许天福, 张延军, 曾昭发, 等. 增强型地热系统(干热岩)开发技术进展[J]. 科技导报, 2012, 30(32): XU T F, ZHANG Y J, ZENG Z F, et al. Technology progress in an Enhanced Geothermal System (Hot Dry Rock)[J]. Science & Technology Review, 2012, 30(32): 42-45.
- [3] 翁定为, 雷群, 胥云, 等. 缝网压裂技术及其现场应用. 石油学报, 2011, 32(2): 280-284. WENG D W, LEI Q, XU Y, et al. Network

- fracturing techniques and its application in the field[J]. *Acta Petrolet Sinica*, 2011, 32(2): 280–284.
- [4] ABUAISH M, LORET B, EATON D. Enhanced geothermal systems (EGS): Hydraulic fracturing in a thermo-poroelastic framework. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2016, 146: 1179–1191.
- [5] 丁云宏, 胥云, 翁定为, 等. 低渗透油气田压裂优化设计新方法. *天然气工业*, 2009, 29(9): 78–80. DING Y H, XU Y, WENG D W, et al. A new method of fracturing optimization design for low-permeability oil and gas fields[J]. *Natural Gas Industry*, 2009, 29(9): 78–80.
- [6] 赵金洲, 任岚, 胡永全. 页岩储层压裂缝成网延伸的受控因素分析. *西南石油大学学报 (自然科学版)*, 2013, 35(1): 1–9. ZHAO J Z, REN L, HU Y Q. Controlling Factors of Hydraulic Fractures Extending into Network in Shale Formations[J]. *Journal of Southwest Petroleum University(Science & Technology Edition)*, 2013, 35(1): 1–9.
- [7] ZHANG L, ZHOU F, MOU J, et al. Large-scale true tri-axial fracturing experimental investigation on diversion behavior of fiber using 3D printing model of rock formation[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, 181: 106171.
- [8] YANG C, ZHOU F, FENG W, et al. Plugging mechanism of fibers and particulates in hydraulic fracture[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, 176: 396–402.
- [9] HAN K, FENG Y, OWEN D. Coupled lattice Boltzmann and discrete element modelling of fluid-particle interaction problems. *Computer & Structure*, 2017, 85(11–14): 1080–1088.
- [10] HU X, WU K, SONG X, et al. 2018. A new model for simulating particle transport in a low - viscosity fluid for fluid - driven fracturing[J]. *AIChE J.* 64 (9), 3542–3552.
- [11] GONG Y, MEHANA M, EL-MONIER I, et al. Proppant Placement in Complex Fracture Geometries: A Computational Fluid Dynamics Study[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2020: 103295.
- [12] 陈锡忠. 模拟颗粒流体系统的混合动态多尺度方法[D]. 博士学位论文, 中国科学院大学, 2016. CHEN X Z. Hybrid dynamic multiscale approach for simulating granular fluid systems[D]. Doctoral dissertation, University of Chinese Academy of Sciences, 2016.
- [13] SANTOS L, DAHI T A, LI G. Expandable proppants to moderate production drop in hydraulically fractured wells[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2018, 55: 182–190.
- [14] Lee L, DAHI T A . Looking at Fracture Sealing Mechanisms by Granular LCM at Elevated Temperatures[C]. *PROCEEDINGS, 45th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*. Stanford, California: Stanford University, 2020.
- [15] KHALED MA, DAHI T A, LI G. Smart lost circulation materials for wellbore strengthening[C]. *51st US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium*. American Rock Mechanics Association, 2017.
- [16] SHAHRI M P, HUANG J, SMITH C S, et al. Recent advancements in temporary diversion technology for improved stimulation performance[C]. In: *Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference*. Society of Petroleum Engineers, 2016.
- [17] ANDERSON T B, JACKSON R A. fluid mechanical description of fluidized beds[J]. *Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals*, 1967, 6: 527–539.
- [18] POSCHEL T, SCHWAGER T. *Computational Granular Dynamics: Models and Algorithms*[M]. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2005.
- [19] TAKEUCHI S, WANG S, RHODES M. Discrete element simulation of a flat - bottomed spouted bed in the 3D cylindrical coordinate system[J]. *Chemical Engineering Science*, 2004, 59(17): 3495–3504.
- [20] MANSOURPOUR Z, KARIMI S, ZARGHAMI R , et al. Insights in hydrodynamics of bubbling fluidized beds at elevated pressure by DEM–CFD approach[J]. *Particuology*, 2010, 8: 407–414.

(责任编辑 林伯韬 编辑 马桂霞)