

压裂气井支撑剂回流影响因素数值模拟研究

钱雅慧, 焦国盈*, 章跃, 蒋鑫, 梁梦琬

重庆科技大学石油与天然气工程学院, 重庆

收稿日期: 2026年8月24日; 录用日期: 2026年9月9日; 发布日期: 2026年9月21日

摘要

支撑剂回流是压裂气井开采过程中的核心工程问题之一。生产流速对支撑剂回流有着重要影响, 流速过快会导致支撑剂大量脱落回流, 引起人工裂缝闭合塌陷、导流能力严重下降及地面管线冲蚀破坏; 而流速过慢则会加剧地层伤害, 制约气井产能充分释放。本文针对压裂气井生产工况, 基于计算流体力学与离散颗粒元(CFD-DEM)双向流固耦合仿真方法, 建立了长宽高为200 mm × 2 mm × 30 mm的三维数值裂缝流动模型。以Case 0 (支撑剂密度2560 kg/m³、粒径0.425 mm、入口流速0.5 m/s)为基准工况, 严格设置了涵盖支撑剂密度(1650、2560、3300 kg/m³)、颗粒粒径(0.212、0.300、0.425、0.850 mm)及入口流速(0.2、0.3、0.5、0.6、0.7、0.8 m/s)的11组数值模拟计算工况(Case 0 ~ Case 10), 系统分析了裂缝内气相冲刷通道过程、影响因素敏感性以及回流质量特征。研究表明: 通道边界流速达到临界起动流速是诱发颗粒起动回流的微观主因; 随着入口流速从0.2 m/s增加到0.8 m/s, 支撑剂回流相对质量呈现非线性加速, 0.5 m/s附近存在显著的稳定界限; 增大颗粒粒径(0.212 mm至0.850 mm)和提高颗粒密度(1650 kg/m³至3300 kg/m³)均能大幅削减回流总量。本研究为控制支撑剂回流, 科学设计返排及生产参数、提高压后效果有着重要指导意义。

关键词

压裂气井, 支撑剂回流, CFD, DEM, 临界流速, 回流质量

Numerical Simulation Study on the Influencing Factors of Proppant Flowback in Fractured Gas Wells

Yahui Qian, Guoying Jiao*, Yue Zhang, Xin Jiang, Menglong Liang

School of Petroleum Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing

Received: August 24, 2026; accepted: September 9, 2026; published: September 21, 2026

*通讯作者。

文章引用: 钱雅慧, 焦国盈, 章跃, 蒋鑫, 梁梦琬. 压裂气井支撑剂回流影响因素数值模拟研究[J]. 石油天然气学报, 2026, 48(3): 508-517. DOI: 10.12677/jogt.2026.483055

Abstract

Proppant flowback is one of the critical engineering challenges encountered during the production of fractured gas wells. Production flow velocity has a significant influence on proppant flowback. Excessively high flow velocity can induce substantial proppant mobilization and flowback, resulting in propped-fracture closure and collapse, severe reduction in fracture conductivity, and erosion damage to surface flowlines. In contrast, excessively low flow velocity may aggravate formation damage and limit the effective release of gas-well productivity. In this study, a three-dimensional numerical fracture-flow model with dimensions of $200\text{ mm} \times 2\text{ mm} \times 30\text{ mm}$ was established for the production conditions of fractured gas wells using a two-way coupled computational fluid dynamics-discrete element method (CFD-DEM). Case 0, with a proppant density of 2560 kg/m^3 , particle diameter of 0.425 mm , and inlet velocity of 0.5 m/s , was selected as the baseline case. A total of 11 numerical simulation cases (Case 0 ~ Case 10) were systematically designed by varying proppant density (1650 , 2560 , and 3300 kg/m^3), particle diameter (0.212 , 0.300 , 0.425 , and 0.850 mm), and inlet velocity (0.2 , 0.3 , 0.5 , 0.6 , 0.7 , and 0.8 m/s). The gas-phase erosion and channelization process within the fracture, the sensitivity of proppant flowback to the governing parameters, and the characteristics of flowback mass were systematically investigated. The results show that the attainment of the critical incipient-motion velocity at the channel boundary is the primary microscopic mechanism responsible for proppant mobilization and subsequent flowback. As the inlet velocity increased from 0.2 to 0.8 m/s , the relative proppant flowback mass exhibited a nonlinear accelerating trend, with a distinct stability threshold occurring at approximately 0.5 m/s . Increasing the particle diameter from 0.212 to 0.850 mm and the proppant density from 1650 to 3300 kg/m^3 both substantially reduced the total flowback mass. These findings provide valuable guidance for controlling proppant flowback, optimizing flowback and production parameters, and improving post-fracturing stimulation performance.

Keywords

Fractured Gas Wells, Proppant Flowback, CFD, DEM, Critical Flow Velocity, Flowback Mass

Copyright © 2026 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

水力压裂作为非常规天然气高效开发的核心增产技术，通过向地层注入高压携砂液使储层起裂，并利用支撑剂充填构建高导流通道[1]。然而，在气井压裂后的试采及初期投产生产过程中，高速气流在狭窄裂缝通道内冲刷流动，极易促使已充填的支撑剂颗粒发生失稳脱附并随气相流体排出，产生严重的“支撑剂回流”现象。支撑剂的大量回流不仅会导致近井地带支撑骨架破坏、水力裂缝闭合，大幅削弱甚至丧失导流能力[2]，还会严重磨损井下节流装置与地面排采设备，诱发出砂卡泵等井下复杂事故，制约气井的长期稳定安全生产[3][4]。因此，系统探明气井生产过程中支撑剂的回流特征及主控因素，对指导裂缝支撑设计及优化控砂排采制度具有重要的工程实际意义[5]。

国内外学者开展了大量的室内流动实验与数值计算。早期研究多通过物理实验观察气流速度对支撑剂出砂量的影响，或利用传统流体模型预测回流趋势[6]-[8]。然而，在狭窄裂缝内部，气体冲刷并带走支撑剂的过程，涉及气体流动与颗粒碰撞的复杂相互作用。传统的纯流体计算方法很难精细模拟单个颗粒

的受力与滚动脱落,无法真实展现气流冲刷下砂床表面颗粒的运动细节[9]。采用计算流体动力学与离散颗粒模拟相结合的 CFD-DEM 方法,既能准确计算气体的流动状态,又能直接追踪每个支撑剂颗粒的运动和碰撞,清晰揭示支撑剂脱落机理及流动过程[10][11]。

本文针对压裂气井生产阶段的气流冲刷过程,结合气相局部平均 Navier-Stokes 方程与 DEM 离散颗粒元动力学,建立三维水力裂缝内气-固两相 CFD-DEM 双向流固耦合数值模型。建立长宽高为 200 mm × 2 mm × 30 mm 的三维数值裂缝流动模型。以 Case 0 (密度 2560 kg/m³、粒径 0.425 mm、流速 0.5 m/s)为基准工况,严格围绕包含支撑剂密度(Case 0、Case 1、Case 2)、颗粒粒径(Case 3、Case 4、Case 0、Case 5)及入口流速(Case 6、Case 7、Case 0、Case 8、Case 9、Case 10)的 11 组指定模拟工况开展计算,重点量化分析各参数对回流相对质量的影响机制,并探讨回流质量的时间阶段性产出规律,为优化压裂气井生产制度提供理论指导。

2. 数理模型和计算方法

2.1. 模型描述和控制方程

本文结合流体连续相流动问题与颗粒离散相碰撞运动问题,建立 CFD-DEM 双向流固耦合仿真模型。气相流体视为连续介质,通过求解局部平均的 Navier-Stokes 方程获得;支撑剂颗粒相采用离散颗粒元方法在拉格朗日体系下追踪运动。

2.1.1. 气相控制方程

气相连续性方程与动量守恒方程分别表示为:

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

$$\frac{\partial(\alpha_f \rho_f \mathbf{u}_f)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_f \rho_f \mathbf{u}_f \mathbf{u}_f) = -\alpha_f \nabla p + \nabla \cdot (\alpha_f \boldsymbol{\tau}_f) + \alpha_f \rho_f \mathbf{g} - S_p \quad (2)$$

式中: α_f 为流体体积分数(空隙率); ρ_f 为气体密度, kg/m³; $\mathbf{u}_f$ 为流体局部平均速度, m/s; p 为流体静压, Pa; $\boldsymbol{\tau}_f$ 为黏性应力张量, Pa; $\mathbf{g}$ 为重力加速度, m/s²; S_p 为颗粒相对流体相的动量交换源项, N/m³。气相湍流模拟采用 Realizable- ϵ 湍流模型,该模型对强剪切流与分离流动具有良好的计算精度。

2.1.2. 颗粒相控制方程

对于单个支撑剂颗粒 i (质量 m_i , 转动惯量 I_i), 其平动与自转控制方程遵循:

$$m_i \frac{d\mathbf{v}_i}{dt} = F_{drag,i} + F_{p,i} + F_{lift,i} + \sum_{j=1}^{k_c} (F_{c,ji}^n + F_{c,ij}^t) + m_i \mathbf{g} \quad (3)$$

$$I_i \frac{d\boldsymbol{\omega}_i}{dt} = \sum_{j=1}^{k_c} (T_{c,ij} + T_{r,ij}) \quad (4)$$

式中: $\mathbf{v}_i$ 和 $\boldsymbol{\omega}_i$ 分别为颗粒平动速度与角速度; $F_{drag,i}$ 为流体拖曳力(采用 Ergun&Wen-Yu 混合模型计算); $F_{p,i}$ 为压力梯度力; $F_{lift,i}$ 为流体升力; $F_{c,ji}^n$ 与 $F_{c,ij}^t$ 分别为颗粒接触的法向与切向力; $T_{c,ij}$ 与 $T_{r,ij}$ 分别为接触扭矩与滚动阻力矩。颗粒接触力学模型采用非线性 Hertz-Mindlin 无滑移接触模型。

2.2. 几何模型与网络划分

根据水力裂缝几何形态研究的假设和推论,单条水力裂缝在局部扩展过程中缝高为常数且宏观形态为矩形平板通道[12]。据此构建三维数值裂缝几何模型,长宽高严格设定为 200 mm × 2 mm × 30 mm (流

向 $X=200\text{ mm}$ ，开度 $Y=2\text{ mm}$ ，高度 $Z=30\text{ mm}$)；网格采用结构化四面体网格，网格特征尺度为颗粒粒径的 2~3 倍，具体模型如图 1 所示。

边界条件设置： $X=0\text{ mm}$ 端面为速度入口，输入具有恒定流速的气体； $X=200\text{ mm}$ 端面为恒压出口(表压 0 Pa)；顶底面为无滑移壁面；前后缝壁施加恒定法向应力。支撑剂颗粒视为规则球形，初始状态填充于裂缝下部形成矩形颗粒堆，初始堆积高度设定为 24 mm (占总缝高 80%)，颗粒堆上方预留 6 mm 自由流动空间。

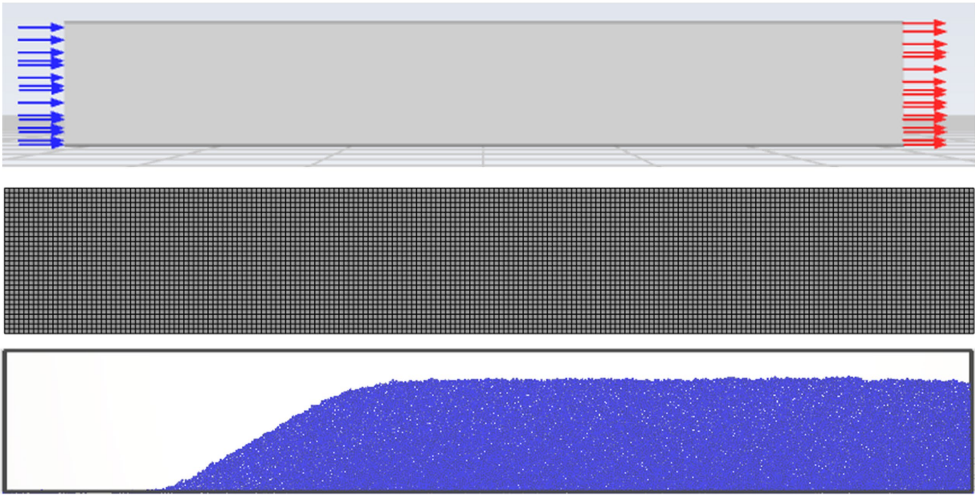


Figure 1. Schematic of the three-dimensional numerical fracture geometry, mesh generation, and initial proppant packing configuration

图 1. 三维数值裂缝几何模型、网格划分及初始颗粒充填状态示意图

2.3. 模拟计算工况方案

为了系统研究支撑剂参数(粒径和密度)以及生产流速对支撑剂回流与临界失稳条件的影响，严格按照设计的 11 组模拟工况(Case 0 ~ Case 10)开展数值仿真。基准工况(Case 0)参数为：支撑剂密度 2560 kg/m^3 、粒径 0.425 mm 、入口流速 0.5 m/s 。具体工况参数如表 1 所示。

Table 1. Numerical simulation case parameters (Case 0 ~ Case 10)

表 1. 数值模拟计算工况参数表(Case 0 ~ Case 10)

工况编号	支撑剂密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	粒径 d/mm	入口流速 $u_{\text{inlet}}\text{ (m/s)}$
Case 0 (基准)	2560	0.425	0.5
Case 1	1650	0.425	0.5
Case 2	3300	0.425	0.5
Case 3	2560	0.212	0.5
Case 4	2560	0.300	0.5
Case 5	2560	0.850	0.5
Case 6	2560	0.425	0.2
Case 7	2560	0.425	0.3
Case 8	2560	0.425	0.6
Case 9	2560	0.425	0.7
Case 10	2560	0.425	0.8

3. 支撑剂颗粒临界启动判据

3.1. 表层颗粒微观力学平衡方程

在气体冲刷流动通道发育过程中, 砂床表层单颗粒的失稳脱落与回流本质上是气动力矩与颗粒自重阻力矩、颗粒间接触力矩相互竞争平衡失调的结果。选取砂床最上表面处于临界受力状态的单个支撑剂颗粒作为分析单元。作用在颗粒上的主要外力包括: 高速流体施加的沿流动方向的水平气动拖曳力 F_D 、垂直向上的 Saffman 气动升力 F_L 、流体静压梯度力 F_p 、颗粒自身等效重力 G , 以及下层接触颗粒提供的法向支撑力 F_N 和切向滚动摩擦力 F_R 。

支撑剂颗粒在床层表面的失稳形式主要表现为绕下游颗粒接触支点的滚动起动失稳。以颗粒与下层支撑颗粒的接触支点 O 为旋转中心, 建立表层颗粒临界起动失稳力矩平衡判据方程:

$$M_{\text{drag}} + M_{\text{lift}} + M_p \geq M_G + M_{\text{inter}} \quad (5)$$

式中: $M_{\text{drag}} = F_D \cdot l_D$ 为水平气动力矩, $\text{N}\cdot\text{m}$; $M_{\text{lift}} = F_L \cdot l_L$ 为垂直气动升力矩, $\text{N}\cdot\text{m}$; $M_p = F_p \cdot l_p$ 为压力梯度力矩, $\text{N}\cdot\text{m}$; $M_G = (G - \rho_f \cdot g \cdot V_p) \cdot l_G$ 为颗粒浸没重力阻力矩, $\text{N}\cdot\text{m}$; M_{inter} 为周围配位颗粒接触力链形成的抗滚阻力矩, $\text{N}\cdot\text{m}$; l_D 、 l_L 、 l_p 、 l_G 分别为对应外力相对于支点 O 的力臂。

当裂缝内局部气流速度较低时, 等效自重力矩与颗粒间咬合力矩占据主导地位, 颗粒能够维持在静止状态; 随着气流冲刷速度增加, 气动拖曳力与升力迅速增大。当外加倾覆力矩超过临界阻力矩极限时, 表层颗粒发生旋转失稳脱附并进入高速流动通道, 随主流排出形成回流。

3.2. 临界起动流速理论解析模型与验证

结合非定常气相流动动力学理论与颗粒 Shields 准则, 引入颗粒非球形度与配位数修正, 推导出表层支撑剂颗粒发生起动的理论临界流速 u_c 的解析表达式:

$$u_c = \sqrt{\frac{4gd_s(\rho_s - \rho_f)(\sin\theta_c + f_c \cos\theta_c)}{3\rho_f(C_D + C_L \tan\theta_c)}} \quad (6)$$

式中: d_s 为支撑剂颗粒直径, m ; ρ_s 为支撑剂颗粒密度, kg/m^3 ; ρ_f 为气相流体密度, kg/m^3 ; g 为重力加速度, m/s^2 ; θ_c 为颗粒堆积的有效临界休止角(根据实测取值 $32^\circ \sim 36^\circ$); f_c 为颗粒间切向接触摩擦因数; C_D 为非球形颗粒的气动拖曳力系数; C_L 为颗粒气动升力系数。

4. 模拟结果

4.1. 流动通道稳定过程

在绝大部分计算工况下, 流体会在颗粒堆上部形成流动通道, 即局部高速流动区域, 带动支撑剂颗粒运动[10]。图 2 和图 3 展示了基准工况(Case 0: $\rho = 2560 \text{ kg/m}^3$, $d = 0.425 \text{ mm}$, $u_{\text{inlet}} = 0.5 \text{ m/s}$)下充分发展流场的速度分布云图与颗粒堆形态演变。当气流从入口处进入到支撑剂堆的上部分, 流动空间由大变狭窄, 气体的速度会变大, 从而卷起上表面支撑剂颗粒向出口处迁移; 当气体不再携带支撑剂颗粒迁移时, 流动通道发展停止。

从 DEM 颗粒动力学微观追踪机制分析, 在气流侵蚀初期, 最上层暴露颗粒的平均配位数迅速锐减, 颗粒间原本形成的法向与切向接触力链网络迅速解体瓦解。气动力矩瞬间突破了由颗粒浸没重力和微弱接触咬合力提供的抗滚极限矩, 导致表层颗粒首先进入失稳状态, 随后以跳跃和悬浮的形式迅速剥离砂床并向裂缝出口运移。

对比冲刷前后的颗粒堆形态演化特征可知, 随着高速流体的冲刷侵蚀, 表层颗粒逐渐剥离运移, 颗

粒堆高度发生衰减并最终趋于稳定均匀，其上部空隙区域即形成稳定的流动通道。颗粒堆主体轮廓与流场中的低速流动滞留区高度契合，而上部流动通道则对应流场的高速主流区。这表明最终形成的颗粒堆几何形态由裂缝内部局部的实际流动剪切速率直接控制；流动通道演化停止的力学平衡条件取决于临界起动流速 u_c ， u_c 的相对大小直接决定了砂床表层颗粒能否发生失稳脱附与起动运移。

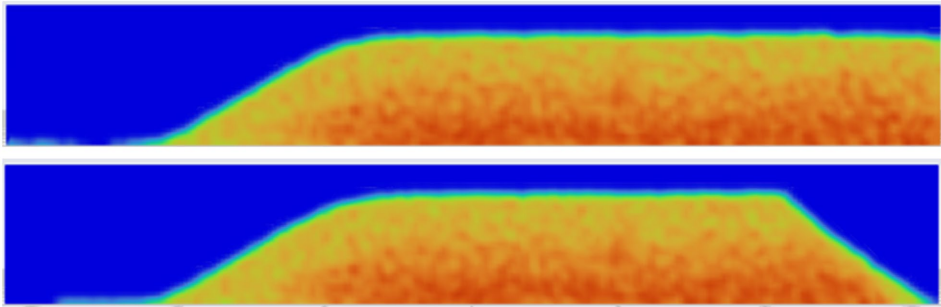


Figure 2. Comparison of proppant bed morphology before and after erosion under the baseline condition (Case 0)

图 2. 基准工况(Case 0)冲刷前后颗粒堆形态对比图

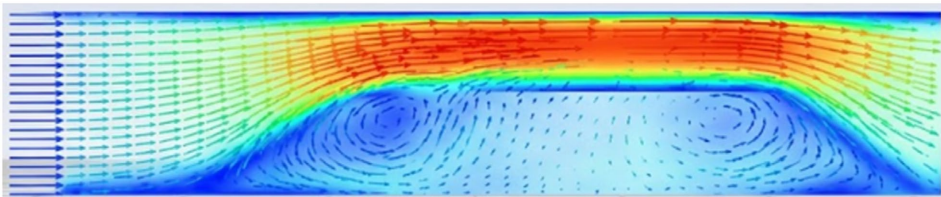


Figure 3. Velocity vector contours of the fully developed flow field under the baseline condition (Case 0)

图 3. 基准工况(Case 0)充分发展的流场速度矢量分布云图

4.2. 边界流速与临界起动流速验证

从图 4 (Case 10)可以看出，随着流动时间 t 的增加，局部流速 u_l 下降，颗粒堆高度 h_l 降低；当流动通道发展到一定程度时， u_l 和 h_l 不再变化，通道发展完毕。对各工况流动通道的后位置的流体速度以及颗粒堆高度，从而计算稳态局部流速 u_l ，如表 2 所示。

Table 2. Comparison of steady-state local flow velocities and theoretical critical velocities under fully developed flow conditions

表 2. 流场充分发展时的稳态局部流速与理论临界值对比

工况编号	砂床高度 h_l	局部流速 u_l (m/s)	临界流速 u_c (m/s)
Case 6	25.45	0.218	0.325
Case 7	24.06	0.324	0.325
Case 0	20.40	0.327	0.325
Case 10	15.08	0.611	0.500
Case 3	16.60	0.204	0.200
Case 5	23.76	0.548	0.550

表 2 中的计算结果说明，当局部流体速度 $u_l \leq u_c$ 时，该处的支撑剂颗粒就能够保持稳定静止。由此可知，流动通道停止发展的条件就是 $u_l \leq u_c$ ，这充分证明了临界起动流速力学模型的合理性。

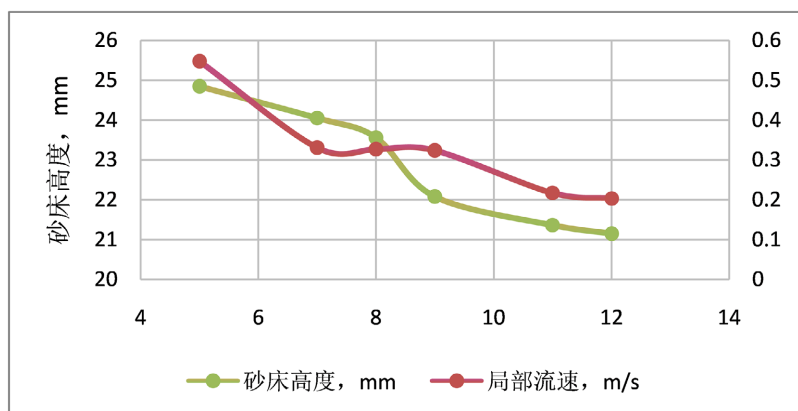


Figure 4. Case 10 dynamic variations in local flow velocity and proppant bed height behind the proppant bed during erosion

图 4. Case 10 颗粒堆后部局部流速与砂床高度随冲刷时间的动态变化曲线

5. 支撑剂回流影响因素敏感性分析

5.1. 入口流速对回流规律的影响(工况 6, 7, 0, 8, 9, 10)

对比工况 Case 6 (0.2 m/s)、Case 7 (0.3 m/s)、Case 0 (0.5 m/s)、Case 8 (0.6 m/s)、Case 9 (0.7 m/s)与 Case 10 (0.8 m/s), 能够系统得到流体入口速度 u_{inlet} 变化对支撑剂颗粒堆稳定性的影响规律。回流相对质量 η 定义为:

$$\eta = \frac{m_b - m_e}{m_b} \times 100\% \quad (7)$$

式中: m_b 为裂缝内初始颗粒质量, g; m_e 为裂缝内剩余颗粒质量, g。

图 5 给出了不同入口流速下流动通道发育稳定后的支撑剂回流相对质量 η 。可以看出, 随着入口流速的增加, 支撑剂回流总量显著上升。当 $u_{inlet} \leq 0.3$ m/s (Case 6、Case 7)时, 回流相对质量 η 仅分别为 0.35%和 1.12%, 处于极低水平, 表明将排采流速控制在临界流速以内能有效抑制支撑剂回流; 而当入口流速由 0.5 m/s (Case 0, $\eta = 8.52\%$)进一步提升至 0.6 m/s (Case 8, $\eta = 14.65\%$)、0.7 m/s (Case 9, $\eta = 20.47\%$)及 0.8 m/s (Case 10, $\eta = 32.25\%$)时, 支撑剂回流量急剧增加。回流量随流速的变化呈现出显著的非线性加速特征, 曲线斜率在流速大于 0.5 m/s 后明显增大, 表明过高的生产流速会加剧支撑剂回流风险。

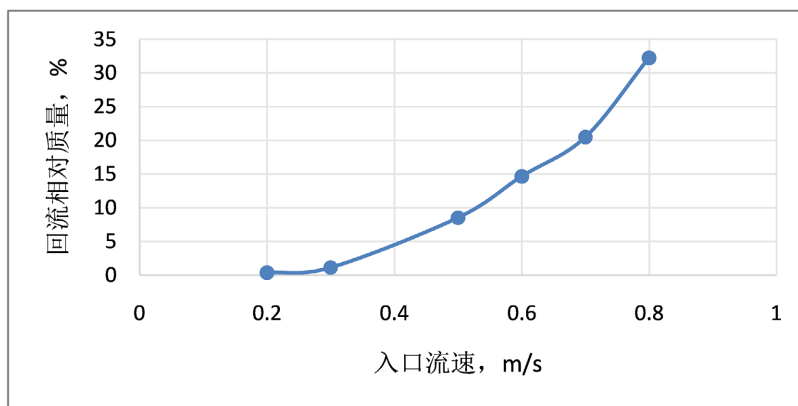


Figure 5. Relative proppant flowback mass η at different inlet velocities (Case 6, Case 7, Case 0, Case 8, Case 9, and Case 10)

图 5. 不同入口流速下支撑剂回流相对质量 η 变化柱状图(Case 6, 7, 0, 8, 9, 10)

在 DEM 微观颗粒运动统计显示：当流速低于 0.5 m/s 时，颗粒失稳剥离主要局限于最表层的单层颗粒低频滚动；而当流速超过 0.5 m/s 时，高速主流产生的强剪切流场不仅剥离最表层颗粒，其向下传递的强湍流脉动压力梯度更进一步诱发次表层力链的雪崩式失稳破坏，导致多层颗粒协同起动并形成群颗粒跃移。

5.2. 支撑剂颗粒粒径的影响(Case 3, 4, 0, 5)

对比工况 Case 3 ($d = 0.212$ mm)、Case 4 ($d = 0.300$ mm)、Case 0 ($d = 0.425$ mm)与 Case 5 ($d = 0.850$ mm)，可系统揭示支撑剂颗粒粒径对颗粒堆稳定性的控制机制。在保持入口流速(0.5 m/s)和颗粒密度(2560 kg/m^3)恒定的条件下，增大颗粒粒径可显著提升颗粒堆的抗冲刷稳定性，大幅削减回流总量，支撑剂回流相对质量 η 与颗粒粒径呈显著负相关(图 6)。随着颗粒粒径由 0.212 mm 增加至 0.300 mm、0.425 mm 和 0.850 mm，回流相对质量分别由 32.15%降低至 19.80%、8.52%和 0.65%。

从颗粒微观接触及力矩平衡角度解析，粒径的增大使自重稳定力矩随尺寸的增长速率远高于气动倾覆力矩；同时，大粒径形成的颗粒间平均接触法向力显著增大，抗转动摩擦力矩显著增强，微观力链网络抵抗气流剪切扰动的刚度大幅提升，从而有效抑制了颗粒起动。

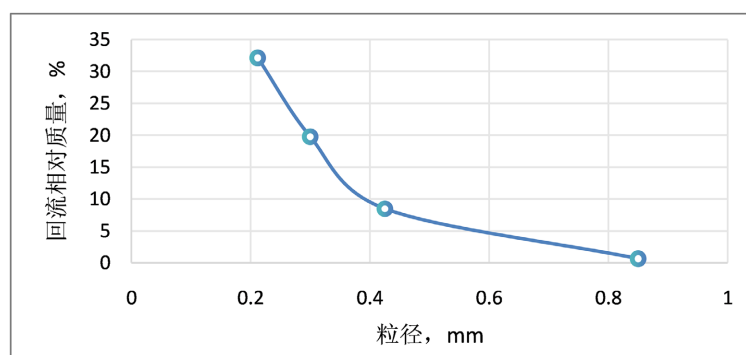


Figure 6. Relative proppant flowback mass η at different proppant diameters (Case 3, Case 4, Case 0, and Case 5)

图 6. 不同颗粒直径下的支撑剂回流相对质量 η 对比图(Case 3, 4, 0, 5)

5.3. 支撑剂颗粒密度的影响(Case 1, 0, 2)

对比工况 Case 1 ($\rho_s = 1650 \text{ kg/m}^3$)、Case 0 ($\rho_s = 2560 \text{ kg/m}^3$)与 Case 2 ($\rho_s = 3300 \text{ kg/m}^3$)，可得到支撑剂颗粒密度对于支撑剂回流质量的影响。在保持入口流速(0.5 m/s)和颗粒粒径(0.425 mm)恒定时，颗粒密度增大同样能够显著增加颗粒堆的稳定性，并大幅减少支撑剂颗粒回流量(图 7)。

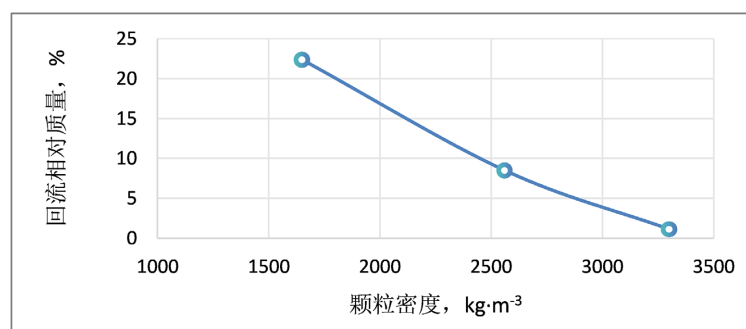


Figure 7. Relative proppant flowback mass η at different proppant densities (Case 1, Case 0, and Case 2)

图 7. 不同颗粒密度下的支撑剂回流相对质量 η 对比图(Case 1, 0, 2)

当支撑剂密度由 1650 kg/m^3 (低密陶粒) 增加至 2560 kg/m^3 (中密陶粒) 及 3300 kg/m^3 (高密陶粒) 时, 回流相对质量 η 由 22.40% 快速下降至 8.52% 与 1.15%。同时, 随着支撑剂颗粒密度的增加, 支撑剂堆积高度变高, 上方的流动通道变窄。影响原因在于颗粒密度直接决定了颗粒自重力矩与颗粒间的法向接触力链强度。增大颗粒密度使得颗粒在床层表面的临界起动流速提高, 使支撑剂堆上表面的颗粒可以抵御气体的高速冲刷作用。

6. 模型局限性

为兼顾颗粒级计算精度与求解效率, 本模型在几何、流体及力学边界上进行了合理简化, 客观上存在以下局限性:

(1) 光滑矩形裂缝简化: 模型假定裂缝为光滑平行壁面, 忽略了真实裂缝壁面的粗糙凸起、迂回弯曲与微裂缝结构。地层壁面粗糙度能够提供机械咬合自锁力并增大边缘摩擦阻力, 且壁面微起伏诱发的局部剪切流动会改变通道边界层的气动侵蚀强度。

(2) 单相气相流动假设: 模型设定流体为干燥单相气流, 主要适用于气井纯气相排采阶段。而在返排初期常存在气-液两相流动, 流体界面毛细管力形成的液桥黏结会增加颗粒起动阻力, 但液滴碰撞及两相流压力脉动也可能加剧局部冲刷失稳。

(3) 未全面考虑地层闭合应力: 模型仅仅引入微弱的闭合应力对支撑剂砂床的挤压压实与颗粒嵌入破碎过程。闭合压力可提高颗粒间接触配位数及初始压紧力以抑制起动, 但长期高应力下破碎产生的微细粉砂则更易在较低流速下发生回流。

上述简化虽与井下复杂地质环境存在一定差异, 但模型抓住了气固两相力矩竞争的核心机理, 其定性规律与临界流速判据对气井返排控砂设计仍具有重要指导意义; 后续研究将结合粗糙缝壁、闭合应力及多相流进一步拓展。

7. 结论

(1) 基于 CFD-DEM 耦合方法建立的裂缝流动模型能够准确模拟气体冲刷支撑剂颗粒的两相流动过程, DEM 微观颗粒追踪表明, 气流对表层力链的破坏是诱发颗粒滚动起动的微观力学诱因; 临界起动流速力学模型具有合理性, 当流动通道发展使得局部边界流速 $u_1 \leq u_c$ 时, 颗粒基本停止运动, 通道达到稳态平衡。

(2) 生产流速是影响支撑剂回流的决定性因素。随着入口流速从 0.2 m/s 增至 0.8 m/s , 回流质量呈非线性增加, 流速超过 0.5 m/s 后次表层力链失稳引发多层颗粒协同跃移, 导致出砂量增加显著加快。将初期生产流速控制在临界流速以内能够有效避免大量颗粒回流。

(3) 支撑剂颗粒参数显著影响颗粒堆稳定性。增大颗粒粒径(由 0.212 mm 增至 0.850 mm)或提高颗粒密度(由 1650 kg/m^3 增至 3300 kg/m^3)均能有效增加颗粒临界起动流速, 提高颗粒抵御气体冲刷的能力, 显著减少回流总量。

(4) 压裂气井投产初期应采取控速排采策略, 将流速控制在临界流速以内以防支撑剂堆骨架破坏; 待稳态通道形成后, 再逐步提产以减少地层伤害并释放产能。

(5) 当前模型基于平直裂缝、单相气流及无动态闭合应力等简化条件, 深入揭示了气固动力学核心机理; 后续需进一步拓展至考虑壁面粗糙度、闭合应力挤压及多相流耦合等更贴近井下真实现场的复杂工况。

参考文献

- [1] 邹才能, 张国生, 杨智, 等. 非常规油气概念、特征、潜力及技术——兼论非常规油气地质学[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(4): 385-399.

-
- [2] 杨兆中, 游家乐, 李小刚, 等. 考虑粗糙度和闭合压力的低渗砂岩储层支撑剂回流机理研究[J/OL]. 特种油气藏: 1-14. <https://link.cnki.net/urlid/21.1357.TE.20260430.1405.002>, 2026-08-24.
- [3] Garbino, A.G., Espinoza, D.N., McClure, M., *et al.* (2024) Modeling of Proppant Flowback to Quantify and Predict Its Impact on Shale Gas Production Under Different Drawdown Strategies—A Vaca Muerta Case Study. *SPE/AAPG/SEG Unconventional Resources Technology Conference*, Houston, June 2024.
- [4] 胡松. 致密储层支撑剂返排出砂及防支撑剂回流参数优化研究[D]: [硕士学位论文]. 大庆: 东北石油大学, 2024.
- [5] Parker, M. and Vanbatenbur, G.D. (1999) Understanding Proppant Flowback. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, Houston, October 1999.
- [6] 王雷, 温恒. 压裂液返排速度对支撑剂回流量影响实验研究[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(26): 200-203.
- [7] 胡景宏, 何顺利, 李勇明, 等. 压裂液强制返排及支撑剂回流模型研究[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2008, 23(5): 57-61.
- [8] 艾池, 张永晖, 赵万春, 等. 压裂液返排过程中支撑剂回流规律研究[J]. 石油钻采工艺, 2012, 34(2): 70-73.
- [9] 张旭东. 页岩储层压裂裂缝中支撑剂输送规律数值模拟研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南石油大学, 2016.
- [10] 张矿生, 陈宝春, 吴勇, 等. 压裂液返排冲刷支撑剂颗粒的DEM-CFD模拟研究[J]. 工程热物理学报, 2023, 44(4): 1009-1014.
- [11] 焦国盈, 王嘉淮, 潘竞军, 等. 支撑剂回流研究进展[J]. 西部探矿工程, 2007, 19(4): 64-67.
- [12] 韩琦. 超低密度支撑剂在裂缝中输送的CFD-DEM模拟研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南石油大学, 2018.