

文章编号: 0253-2697(2017)04-0475-10 DOI:10.7623/syxb201704012

超临界二氧化碳射流中的颗粒跟随及影响因素

贺振国^{1,2} 李根生¹ 王海柱¹ 田守增¹ 沈忠厚¹ 邵尚奇³ 刘新云²

(1. 中国石油大学油气资源与探测国家重点实验室 北京 102249; 2. 中国石油勘探开发研究院 北京 100083;
3. 中海油服油田生产服务事业部 天津 300450)

摘要:超临界二氧化碳射流具有破岩速度高、门限压力低等优势,加入磨料颗粒形成超临界二氧化碳磨料射流,将取得更高的冲蚀切割效率。为研究超临界二氧化碳磨料射流可行性,采用数值模拟方法,对比分析了单个颗粒在超临界二氧化碳等流体射流中的运动特征,揭示了流体温度、磨料粒径对颗粒跟随运动的影响规律。结果表明,与相同条件下在水与压裂液射流中相比,磨料颗粒在超临界二氧化碳射流中运动规律相似,但初始滑脱速度较大、跟随能力较弱,获得的喷射速度与撞击靶件壁面速度较高,表明超临界二氧化碳具有良好的颗粒携带能力;流体温度升高、磨料粒径增大均会使颗粒滑脱速度增大、削弱跟随运动效率,但同时也降低了喷嘴外流场中颗粒所受运动阻力,显著提高了喷射速度与撞击壁面速度。由此可知,对于石英、陶粒等常用磨料材质,在常规储层温度(60~140℃)与粒径范围(20~70目)内,超临界二氧化碳磨料射流可有效形成并进行高效冲蚀切割作业。

关键词:超临界二氧化碳;射流;单个颗粒;跟随;影响因素

中图分类号:TE357.1 **文献标识码:**A

Particle following motion in supercritical carbon dioxide jet and its influence factors

He Zhenguo^{1,2} Li Gensheng¹ Wang Haizhu¹ Tian Shouceng¹ Shen Zhonghou¹ Shao Shangqi¹ Liu Xinyun²

(1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;
2. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing 100083, China;
3. COSL Production Optimization Business Division, Tianjin 300450, China)

Abstract: Supercritical carbon dioxide (SC-CO₂) jet has such advantages as high rock-breaking velocity and low threshold pressure. The addition of abrasive particles will lead to SC-CO₂ abrasive jet with high erosion and cutting efficiency. To study the feasibility of SC-CO₂ abrasive jet, numerical simulation methods were used to analyze the single-particle motion characteristics in different fluid jets such as SC-CO₂ jet and reveal the influence laws of fluid temperature and abrasive size on particle following motion. Results indicate that compared with the water and fracturing fluid jet under equal conditions, abrasive particles have similar motion laws in the SC-CO₂ jet, characterized by large initial slipping velocity and weak following capacity. However, high jet velocity and large target-wall impinging velocity are obtained, proving that the SC-CO₂ has favorable particle carrying capacity. The increase of fluid temperature and abrasive size will not only improve the particle slipping velocity and weaken the particle following motion efficiency, but also reduce the particle motion resistance in the nozzle external flow field and significantly raise the jet velocity and target-wall impinging velocity. As a consequence, in the ranges of conventional reservoir temperature (60-140℃) and particle diameter (20-70 mesh) for quartz, ceramicsite and common abrasive materials, SC-CO₂ abrasive jet is expected to be formed for highly efficient erosion and cutting operations.

Key words: supercritical CO₂; jet; single abrasive particle; following motion; sensitivity analysis

引用:贺振国,李根生,王海柱,田守增,沈忠厚,邵尚奇,刘新云.超临界二氧化碳射流中的颗粒跟随及影响因素[J].石油学报,2017,38(4):475-484.

Cite: HE Zhenguo, LI Gensheng, WANG Haizhu, TIAN Shouceng, SHEN Zhonghou, SHAO Shangqi, LIU Xinyun. Particle following motion in supercritical carbon dioxide jet and its influence factors[J]. Acta Petrolei Sinica, 2017, 38(4): 475-484.

大型水力压裂技术是目前美国开发页岩气等非常规油气藏的主要手段之一^[1]。中国页岩气藏储层特征差异显著,渗透率极低,且资源所处的中国西部地区水

资源匮乏、地形复杂、生态环境薄弱,实施大型水力压裂作业因具有高成本、高风险的缺点而饱受争议^[2-3],因此亟需在新型、环保、高效的压裂方法上获得攻关^[4-5]。

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973)项目(2014CB239203)、国家自然科学基金国际合作项目(No. 51210006)、国家自然科学基金石油化工联合基金重点项目(U1562212)资助。

第一作者:贺振国,男,1986年2月生,2008年获中国石油大学(北京)学士学位,2016年获中国石油大学(北京)博士学位,现为中国石油勘探开发研究院工程师,主要从事国内外油气钻井工程方案设计与技术支持工作。Email: hezhenguo@petrochina.com.cn

通信作者:李根生,男,1961年9月生,1983年获华东石油学院学士学位,1998年获石油大学(北京)博士学位,现为中國工程院院士、中国石油大学(北京)博士生导师,主要从事油气钻井和完井工程研究工作。Email: ligens@cup.edu.cn

2004年,沈忠厚院士提出了利用超临界二氧化碳(SC-CO₂)流体作为作业流体进行页岩气等非常规油气资源开发的新思路。这一设想一旦实现,将有效缓解当前页岩气开发过程中的水资源消耗,同时还可促进二氧化碳减排,为环保做出重要贡献^[6-7]。

研究表明,超临界二氧化碳性质独特,更易于与岩石发生作用,借助射流技术形成喷射压裂工艺,可望成为页岩气藏增产的新技术手段^[8-10]。为此,笔者提出在超临界二氧化碳射流中加入磨料颗粒形成超临界二氧化碳磨料射流,期望获得超临界二氧化碳射流与磨料射流的双重优势,高效完成喷砂射孔作业。然而,超临界二氧化碳流体黏度低,仅约为水的十分之一,能否高效携带磨料颗粒并形成超临界二氧化碳磨料射流仍有待考证。因此,有必要对超临界二氧化碳射流中的磨料颗粒跟随运动进行研究。笔者以计算流体力学为基础,建立了喷嘴内外三维喷射流场模型,以单个磨料颗粒为研究对象,对超临界二氧化碳射流流体与磨料颗粒两相运动进行了仿真模拟计算,得到了不同流体介质、流体温度、磨料粒径条件下射流流体与颗粒沿流场中轴线速度的相对分布规律,初步评价了磨料颗粒在超临界二氧化碳射流中的跟随运动效率与超临界二氧化碳磨料射流的技术可行性,为建设超临界二氧化碳磨料射流实验系统、开展室内实验与现场试验奠定理论基础。

1 模型建立

1.1 物理模型与网格划分

基于优化的磨料水射流喷嘴结构与超临界二氧化碳磨料射流射孔实验装置结构,建立了前混式磨料射流三维锥形喷嘴内外流场模型(图1)。喷嘴由混合腔、收缩段和直管段三部分组成,喷嘴内流场入口与出口直径分别为18.0 mm和6.0 mm,直管段长为出口直径的2倍,喷嘴收缩夹角为30.5°;喷嘴外流场为圆柱体,直径为60 mm,将喷嘴出口到壁面的距离设置为24 mm。

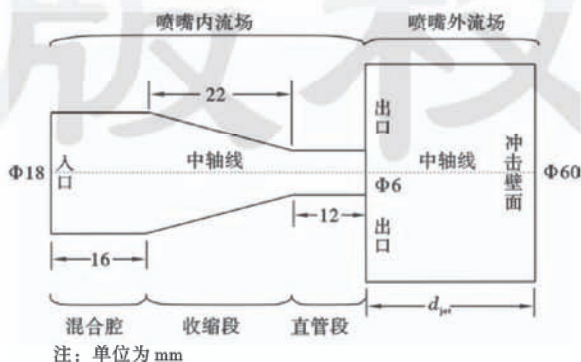


图1 模型平面示意

Fig. 1 Plane sketch of the physical model

由于喷嘴收缩段到射流壁面之间射流速度较高,超临界二氧化碳流体物理性质发生变化,因此对计算域中喷嘴收缩段、直管段以及喷嘴外扩散角为15°的锥形区域进行了网格加密(图2),以提高该段计算精度。

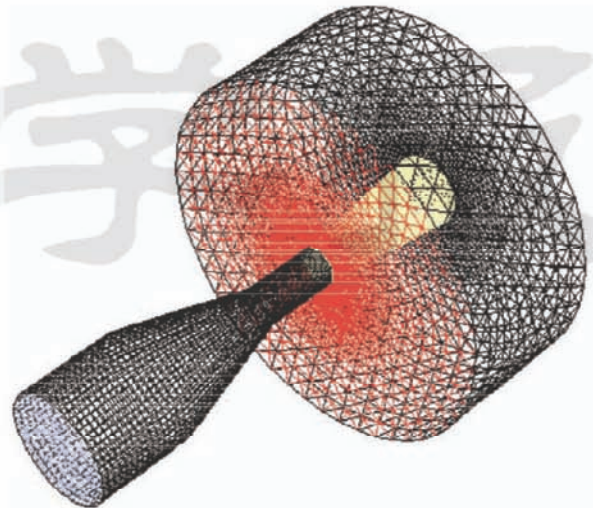


图2 计算域网格

Fig. 2 Mesh of the computational domain

用于工程问题的流体计算必然存在由网格划分方法引起的误差,因此需要选取不同的网格模型进行收敛性分析^[11-12]。应符合:①迭代计算能够较好收敛;②网格疏密对计算结果影响较小。

笔者通过改变网格疏密与单元体格式划分了5种网格模型进行试计算。结果表明,较疏网格在多个算例中迭代残差较大,但流场压力、速度分布特征基本正确;较密网格计算所需内存较大、计算时间过长、计算结果变化幅度有限;全部四面体网格得到最大射流速度差值最大约为5.56%,局部增加喷嘴外流场六面体数目得到的最大射流速度差值分别为6.14%和9.31%。综合考虑计算精度与计算时间,选取了本文网格模型。计算域网格总数为484 956,其中喷嘴和加密区域网格数量为371 549,占网格总数的76.6%。

1.2 边界条件

(1) 喷嘴入口为模型入口边界,如图2蓝色圆面所示。超临界二氧化碳流体性质特殊,可压缩性较强,为在相同条件下充分对比3种流体射流对颗粒的携带能力,指导室内实验与现场应用,分别将3种流体射流的计算设置了相同的压力入口、质量流量入口及速度入口边界条件,且3种入口条件下均为独立算例,即将3种流体射流在相同的压力入口、质量流量入口和速度入口边界条件下进行计算,从而对比得到超临界二氧化碳等3种流体的颗粒携带效率。喷嘴出口外侧环面为模型出口边界,如图2红色环面所示。在3种流体射流的

算例中全部采用压力出口边界条件。

基准模拟边界条件包括:

① $p_{in} = 40 \text{ MPa}$: 压力入口算例中设置入口压力基准值为 40 MPa ;

② $M_{in} = 4.7 \text{ kg/s}$: 质量流量入口算例中设置入口质量流量基准值为 4.7 kg/s ;

③ $u_f = 25.0 \text{ m/s}$: 速度入口算例中设置入口轴向速度基准值为 25.0 m/s ;

④ $p_{am} = 20 \text{ MPa}$: 所有算例中均在模型出口施加回压基准值为 20 MPa ;

⑤ $T_{am} = 353 \text{ K}$: 入口流体温度与环境温度基准值为 353 K 。

(2) 喷嘴出口处与加密网格边界锥面均为内部流域条件,如图2黄色锥形面所示,在该边界条件是由虚拟的一对面组成,流体与颗粒可自由通过,目的是用于设置加密网格,使相邻不同网格密度区域能够顺利传递迭代计算的值;

(3) 其余各面均为无滑移绝热固壁条件,颗粒撞击后将反弹回计算域中;

(4) 采用离散相(DPM)模型定义磨料颗粒属性,根据室内实验与现场应用^[13],假设磨料颗粒为圆球形,并按照工程用石英砂、陶粒等磨料,在离散相中设置本文磨料的材料、大小以及进入流场方向、引射源类型等。

常用的磨料添加方法中,磨料进入流场时,速度大小与高速流束相比可忽略不计,掺混后轴向速度完全由高速流束决定,因此假设颗粒已在混合腔内掺混均匀,获得一定速度后进入喷嘴混合腔,即赋予颗粒初始轴向速度 $u_{p0} = 20.0 \text{ m/s}$ 、初始径向速度 $v_{p0} = 0$ 以及质量流量 $M = 3.4 \times 10^{-5} \text{ kg/s}$ 。

1.3 控制方程

超临界二氧化碳流体与水不同,其密度、黏度等物理性质随温度和压力的变化而变化^[14],进而影响射流流场分布规律及颗粒运动特征。因此,数值模拟计算需采用针对可压缩气体与超临界态二氧化碳流体的状态方程,考虑温度、压力对流体密度、黏度的影响。Span等人通过实验测量,改进了已有状态方程的形式和参数,提出了Span-Wagner模型方程^[15-16]。与以VDW方程为基础的立方型状态方程、Peng-Robinson方程以及维里系列状态方程相比^[17],该模型适用的温度与压力范围更广、计算精度明显提高,目前被广泛采用。因此,笔者采用该模型计算二氧化碳热物理性质。模型采用亥姆霍兹自由能计算流体密度等状态参数,无因次表达式为:

$$\Phi(\delta, \tau) = \Phi_o(\delta, \tau) + \Phi_r(\delta, \tau) \quad (1)$$

推导出压缩因子、定压热容、焦汤系数等表达式,压缩因子表示方法:

$$Z = \frac{\rho(\delta, \tau)}{\rho R T} = 1 + \delta \frac{\partial \Phi_r(\delta, \tau)}{\partial \delta} \quad (2)$$

定压热容表示方法:

$$C_p(\delta, \tau) = R \left[-\tau^2 \left(\frac{\partial^2 \Phi_o}{\partial \tau^2} + \frac{\partial^2 \Phi_r}{\partial \tau^2} \right) + \frac{\left(1 + \delta \frac{\partial \Phi_r(\delta, \tau)}{\partial \delta} - \delta \tau \frac{\partial^2 \Phi_r(\delta, \tau)}{\partial \delta \partial \tau} \right)^2}{1 + 2\delta \frac{\partial \Phi_r(\delta, \tau)}{\partial \delta} + \delta^2 \frac{\partial^2 \Phi_r(\delta, \tau)}{\partial \delta^2}} \right] \quad (3)$$

焦汤系数表示方法^[18]:

$$C_J(\delta, \tau) = R\rho \cdot \left\{ - \left[\delta \frac{\partial \Phi_r(\delta, \tau)}{\partial \delta} + \delta^2 \frac{\partial^2 \Phi_r(\delta, \tau)}{\partial \delta^2} + \delta \tau \frac{\partial^2 \Phi_r(\delta, \tau)}{\partial \delta \partial \tau} \right] \cdot \left\{ \left[1 + \delta \frac{\partial \Phi_r(\delta, \tau)}{\partial \delta} - \delta \tau \frac{\partial^2 \Phi_r(\delta, \tau)}{\partial \delta \partial \tau} \right]^2 - \tau^2 \left[\frac{\partial^2 \Phi_o(\delta, \tau)}{\partial \tau^2} + \frac{\partial^2 \Phi_r(\delta, \tau)}{\partial \tau^2} \right] \cdot \left(1 + 2\delta \frac{\partial \Phi_r(\delta, \tau)}{\partial \delta} + \delta^2 \frac{\partial^2 \Phi_r(\delta, \tau)}{\partial \delta^2} \right) \right\}^{-1} \quad (4)$$

采用Fenghour方法与Vesovic方法分别计算超临界二氧化碳流体黏度与导热系数^[19-20],黏度表示方法为:

$$\mu(\rho, T) = \mu_o(T) + \Delta\mu(\rho, T) + \Delta_c\mu(\rho, T) \quad (5)$$

导热系数表示方法:

$$\lambda(\rho, T) = \lambda_o(T) + \Delta\lambda(\rho, T) + \Delta_c\lambda(\rho, T) \quad (6)$$

超临界二氧化碳为可压缩流体,密度和黏度在射流过程中发生变化,采用三维稳态可压缩流体的质量守恒方程、动量守恒方程和能量守恒方程求解。

质量守恒方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (7)$$

将水与瓜儿压裂液视为不可压缩,对于理想不可压缩流体有:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$$

动量守恒方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho u w)}{\partial z} = \\ \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial z} \right) - \frac{\partial p}{\partial x} + S_x \\ \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v w)}{\partial z} = \\ \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial z} \right) - \frac{\partial p}{\partial y} + S_y \\ \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho w u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho w v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w w)}{\partial z} = \\ \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial z} \right) - \frac{\partial p}{\partial z} + S_z \end{aligned} \quad (8)$$

其中:

$$S_i = F_i + s_i (i = x, y, z)$$

$$s_i = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial t} (\lambda \operatorname{div} \mathbf{u})$$

S_i 为动量守恒方程的广义源项。

对于理想不可压缩流体:

$$S_i = 0$$

能量守恒方程:

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u T)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v T)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w T)}{\partial z} = S_T + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{k_h}{c_p} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{k_h}{c_p} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{k_h}{c_p} \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (9)$$

对于理想不可压缩流体,不考虑热交换对其主要物理性质的影响,不需加入能量守恒方程进行求解。

主要研究对象为直射流场,不存在剧烈涡旋流动,喷嘴内外流场均为高雷诺数区域,因此选用更适用的 standard k- ϵ 两方程湍流模型。对于超临界二氧化碳流体:

湍动能 k 方程(可压缩流动):

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (10)$$

湍流耗散率 ϵ 方程(可压缩流动):

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{C_{1\epsilon} \epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \quad (11)$$

其中:

$$\epsilon = \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\mu_t'}{x_k} \right) \left(\frac{\mu_t'}{x_k} \right); \mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon};$$

$$G_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j};$$

$$G_b = \beta g_i \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_i} (Pr_t \text{ 取值为 } 0.85);$$

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial T}; Y_M = 2 \rho \epsilon M_i^2;$$

$$M_i = k^{0.5} a^{-1}; a = (\gamma RT)^{0.5}$$

对于理想不可压缩流体,在该湍流模型中有

$$G_b = Y_M = S_k = S_\epsilon = 0$$

选用更适用于计算超临界二氧化碳流体物性参数的耦合算法求解。合理选用二阶迎风离散格式,避免低阶离散格式中因人工黏性项而造成计算结果严重不符,一定条件下还可达到高阶离散格式的计算精度,相对减少计算时间与内存占用。模拟计算收敛判据为:迭代残差小于 10^{-6} ,或迭代残差曲线平稳且入口与出口质量流量之差小于入口流量的 0.5%。

仅考虑对颗粒在喷嘴内加速与在喷嘴外造成颗粒

速度衰减具有显著作用的力,主要包括惯性力、拖曳力和虚拟质量力,这些力在整个颗粒运动过程或者是在加速过程中具有显著的影响^[21-23]。由于颗粒径向速度相对于轴向速度可忽略不计、撞击靶件壁面前颗粒几乎不发生旋转等原因,因此诸如 Saffman 力、Magnus 力、举升力等颗粒受力在计算过程中被忽略。

惯性力:

$$F_{in} = \frac{1}{6} \pi d_p^3 \rho_p \frac{du_p}{dt} \quad (12)$$

拖曳力:

$$F_d = F_\tau + F_p = C_D A_p \frac{\rho_p u_p^2}{2} \quad (13)$$

重力:

$$F_g = \frac{\pi}{6} d_p^3 \rho_p g \quad (14)$$

虚拟质量力:

$$F_{vm} = \frac{1}{2} \rho V_p \left(\frac{du}{dt} - \frac{du_p}{dt} \right) \quad (15)$$

1.4 基本假设

根据对磨料水射流、微磨料气射流、微小颗粒运移等理论与模拟实验^[24-25],作出如下基本假设:

①射流过程中几何模型不发生变形;

②仅考虑颗粒与流场内壁的弹性碰撞;

③磨料颗粒视为刚性球体,无质量损失且与射流流体无质量交换;

④由于颗粒较小,除重力之外,仅考虑对颗粒运动影响较大且平行于颗粒运动方向的力。

2 分析与讨论

2.1 颗粒加速超临界二氧化碳射流流体运动分析

在基准模拟条件下,对单个磨料颗粒在超临界二氧化碳射流中运动情况进行了研究,得到计算域内超临界二氧化碳射流速度场与颗粒轨迹线(图3)以及流体与颗粒轴向速度沿中轴线分布(图4)。

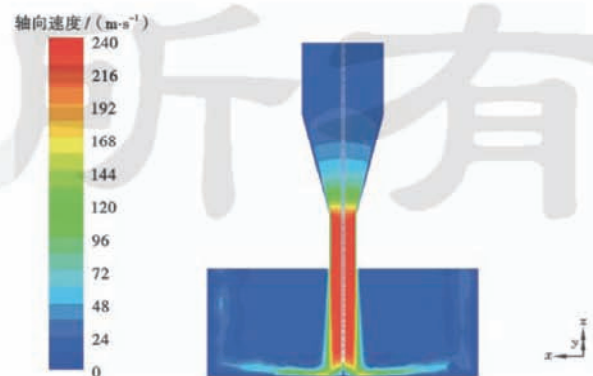


图3 超临界二氧化碳射流速度场分布与颗粒轨迹

Fig. 3 SC-CO₂ jet velocity field distribution and particle trajectory

由图 3 可以看出,流体在喷嘴收缩段后部开始加速,进入直管段后即达到最大,并在喷嘴外保持速度稳定,近壁面处衰减严重。颗粒由入口面圆心处释放并作跟随运动,速度随流体增大且两相间相差较小。

由图 4 可以看出,进入收缩段后($x \approx 16.0 \text{ mm}$),流体压能迅速转化为动能,颗粒速度随流体迅速增大但始终小于流体速度,在收缩段内产生明显滑脱速度并迅速变大,进入直管段($x \approx 38.3 \text{ mm}$)后达到约 40.5 m/s ;随后流体轴向速度到达最大值并逐渐稳定,颗粒在拖曳力作用下继续加速,两相间滑脱速度减小;颗粒在直管段前部 4.0 mm ($x \approx 38.0 \sim 42.0 \text{ mm}$) 长度内速

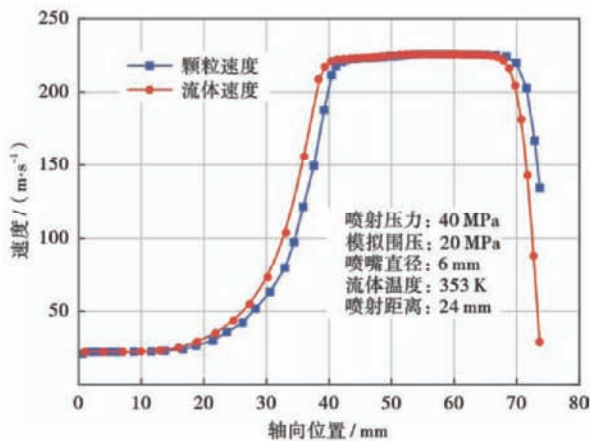


图 4 超临界二氧化碳射流流体与颗粒轴向速度分布

Fig. 4 SC-CO₂ jet fluid and particle axial velocity distribution

表 1 不同颗粒携带流体的力学性质参数

Table 1 Mechanical property parameters of different particle-carrying fluids

流体类型	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	黏度/ ($\text{mPa} \cdot \text{s}$)	压缩系数/ (MPa^{-1})	导热系数/ [$\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$]	比热容/ [$\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$]	表面张力/ ($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)	扩散系数/ ($\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)
超临界二氧化碳	468	0.1~0.01	-	-	-	≈ 0	1×10^{-3}
液态水	998	1.005 0	4×10^{-4}	0.60	4.20×10^3	0.072 67	1×10^{-5}
瓜胶压裂液	950~1050	50~200	4×10^{-4}	0.55	4.19×10^3	0.027 52	1×10^{-5}

在相同入口压力条件(40 MPa)下,将各流体所携带单个磨料颗粒在计算域中轴线 3 个重要位置上的速度进行了对比(图 5)。可以看出,在喷嘴收缩段内($x \approx 38.0 \text{ mm}$),颗粒在 3 种射流流体中的速度大小相差较小,表明颗粒跟随运动规律相似,但在超临界二氧化碳射流中所获得速度较小、滑脱效应明显;喷嘴出口处($x \approx 50.1 \text{ mm}$),超临界二氧化碳射流中颗粒速度为最大且速度优势明显,这是由相同压力条件下超临界二氧化碳射流速度显著大于另外两种射流所致,也表明在该喷嘴模型下,颗粒在超临界二氧化碳射流中可获得充分的加速;在近壁面处($x \approx 73.4 \text{ mm}$),超临界二氧化碳射流中颗粒获得的撞击速度同样为最大。

数据显示,收缩段内超临界二氧化碳射流中颗粒

度仅提高了 54.8 m/s ,收缩段后部 9.0 mm ($x \approx 29.0 \sim 38.0 \text{ mm}$) 长度内速度则显著提高了 118.9 m/s ,喷嘴出口处颗粒轴向速度为 224.2 m/s ,与流体间的滑脱速度仅为 0.7 m/s ,为流体速度的 99.6%。

射流冲击与返回流同时存在,返回流的反向冲击与摩擦阻力使流体轴向速度迅速衰减,而颗粒惯性较大,且两相间摩擦阻力影响有限,因此可以以较大速度撞击靶件壁面。模拟数据显示,距离壁面 0.3 mm 处(因颗粒半径为 0.3 mm ,此处速度视为撞击壁面速度),颗粒与流体轴向速度分别为 134.4 m/s 和 28.9 m/s ,颗粒接触壁面时仍具有较高动能,足以破坏岩石、常见金属等硬脆材料^[26],流体巨大的动能转换为压能,也有助于在岩石孔隙内传递压力波并辅助拉伸破坏。

该模拟条件下,超临界二氧化碳射流的颗粒携带效率更高,可使颗粒获得较高喷射速度与壁面撞击速度,有望形成超临界二氧化碳磨料射流。

2.2 不同流体介质条件下颗粒轴向速度对比分布

为对比研究颗粒在超临界二氧化碳射流中的运动特征,本节在相同入口压力、入口质量流量、入口流速条件下,与颗粒在水和瓜儿压裂液等携带颗粒流体中的速度分布进行了对比。这 3 种流体的部分力学性质参数如表 1 所示。射流参数与磨料颗粒参数同 1.2 小节所述基准模拟条件。

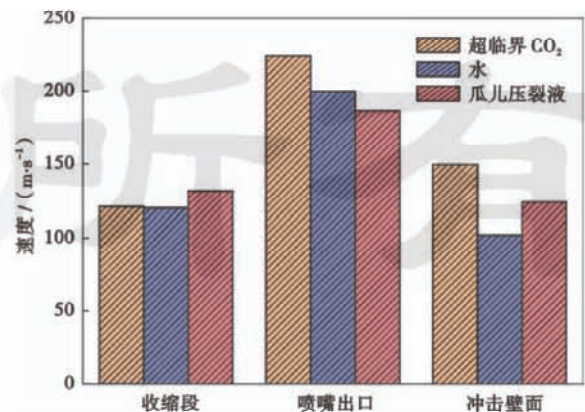


图 5 相同压力条件下颗粒轴向速度对比分布

Fig. 5 Comparative distribution of particle axial velocity at the same pressure

速度是相同条件下压裂液射流中颗粒速度的92.3%，表明颗粒在超临界二氧化碳射流中具有良好的跟随运动效果。3种射流流体中颗粒撞击壁面的速度分别为149.4 m/s、101.9 m/s和123.9 m/s，超临界二氧化碳射流中颗粒撞击速度显著最大。在冲蚀切割能力主要以磨料颗粒速度与动能为主要表征的磨料射流中，超临界二氧化碳磨料射流显然将具有最高的冲蚀切割作业效率。

在相同入口质量流量条件(4.7 kg/s)下，得到了沿中轴线上3个重要位置的颗粒速度对比(图6)。可以看出，同入口压力条件下相似，相同入口质量流量条件下，在喷嘴收缩段内，超临界二氧化碳射流与颗粒间滑脱效应较强，颗粒速度较小、增大过程较慢，但喷射速度与撞击速度均较大。数据显示，在上述3个轴线位置，颗粒在超临界二氧化碳射流中的速度分别是在水射流中速度的91.9%、99.9%和1.35倍。

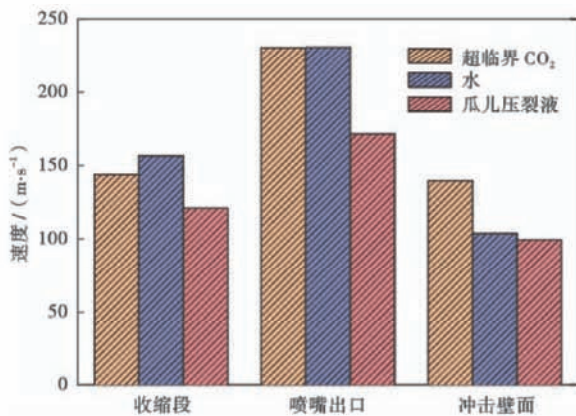


图6 相同质量流量条件下颗粒轴向速度对比分布

Fig. 6 Comparative distribution of particle axial velocity at the same mass flow rate

同样，由图7所示相同入口流速条件(25.0 m/s)下的颗粒轴向速度对比可以看出，喷嘴收缩段内($x \approx 38.0$ mm)，颗粒在超临界二氧化碳射流中速度最小，而在喷嘴出口处为最大，同样表现出该条件下超临界二氧化碳射流最终较高的颗粒携带效率。数据显示，在所述3个代表性位置，颗粒在超临界二氧化碳射流中的速度分别是在瓜儿压裂液射流中对应位置颗粒速度的86.8%、1.11倍和1.32倍。

图8所示为超临界二氧化碳射流与瓜儿压裂液射流流体及所携带磨料颗粒的速度对比曲线，对其中磨料颗粒的跟随运动进行直观对比。在 $x \approx 24.7$ mm处，压裂液射流两相轴向速度均大于超临界二氧化碳射流流体与颗粒的速度；在 $x \approx 36.1$ mm处，超临界二氧化碳射流速度已超过压裂液射流速度，但其中颗粒速度仍相对较小。此外，与压裂液射流相比，超临界二

氧化碳射流与颗粒间滑脱效应较强，颗粒速度占比较小，携带颗粒加速能力较弱。在喷嘴出口处($x \approx 50.1$ mm)，超临界二氧化碳中颗粒速度超过压裂液射流中颗粒，此时颗粒速度增幅大于流体，两相间滑脱速度仅为0.1 m/s，表明颗粒在超临界二氧化碳射流中具有较高跟随运动效率。

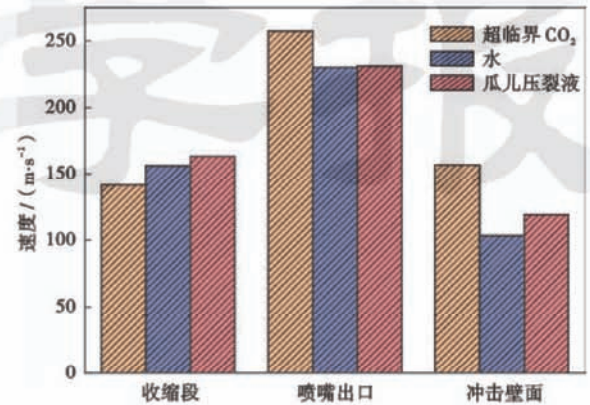


图7 相同流速条件下颗粒轴向速度对比分布

Fig. 7 Comparative distribution of particle axial velocity at the same flow rate

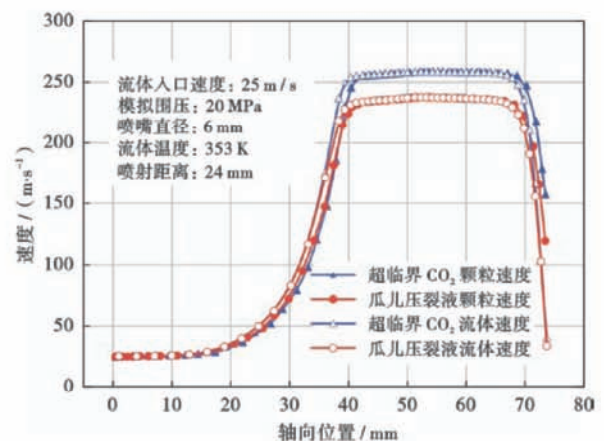


图8 超临界二氧化碳与瓜儿压裂液射流两相速度对比分布

Fig. 8 Comparative distributions of two-phase velocity for SC-CO₂ jet and guar fracturing fluid jet

通过以上对磨料颗粒在不同流体介质、不同入口条件下的模拟结果可以看出，总体上，超临界二氧化碳射流与其中颗粒的滑脱速度较大，携带加速能力较弱，但均能使颗粒获得最高的喷射速度与撞击靶件速度。分析原因有：①超临界二氧化碳流体黏度显著较低，相同条件下射流速度显著大于常规流体，但与颗粒间滑脱效应较强，难以使之迅速加速；②若喷嘴具有足够长的加速段，颗粒可获得与超临界二氧化碳射流近似相等喷射速度，因此大于颗粒在其他流体中的速度；③超临界二氧化碳流体在收缩段内压缩、积聚，黏度增大，颗粒所受超临界二氧化碳射流的拖曳力作用并非显著

小于常规流体;④压裂液因剪切稀释的特性减小了对喷出喷嘴后颗粒的阻力,使之速度衰减小于水射流中颗粒,与之相似,超临界二氧化碳黏度较低且过喷嘴后因焦汤效应再次显著减小,颗粒所受阻力减小,因此,颗粒撞击靶件壁面速度较大。

综上,超临界二氧化碳射流有望有效携带磨料颗粒形成超临界二氧化碳磨料射流,而且由于颗粒将获得更大的喷射速度与撞击靶件壁面速度,超临界二氧化碳磨料射流冲蚀切割作业效率将显著优于常规磨料射流。

2.3 不同流体温度条件下流场轴向位置颗粒速度对比分布

超临界二氧化碳流体是可压缩流体,其密度与黏度等物理性质随环境温度变化而变化,对射流速度及颗粒运动具有重要影响,进而影响冲蚀切割作业效果。为此,对超临界二氧化碳射流的颗粒携带能力随流体温度的变化进行了模拟研究,入口流体温度变化范围为 333~413 K(60~140℃),其他参数设置同 1.2 节基准参数。

图 9 所示为收缩段、喷嘴出口及近壁面处的颗粒轴向速度及无因次速度(颗粒与流体速度比)随流体温度的变化规律,以分析两相间滑脱作用及颗粒跟随运动特征。由图 9 可知,收缩段内颗粒速度随着温度升高而略有下降,无因次速度单调减小,表明超临界二氧化碳射流中颗粒跟随加速能力随流体温度升高而降低;在喷嘴出口处,颗粒轴向速度随流体温度增大而增大,而无因次速度则基本不变,即使超临界二氧化碳射流速度随温度升高而增大,颗粒仍获得了与射流流体近似相等的速度增幅,可知收缩段内颗粒跟随能力的下降并未对喷射速度造成影响,在该温度研究范围内,超临界二氧化碳射流中颗粒仍具有较高的跟随运动效率。数据显示,流体温度由 333 K 升高到 413 K,喷嘴

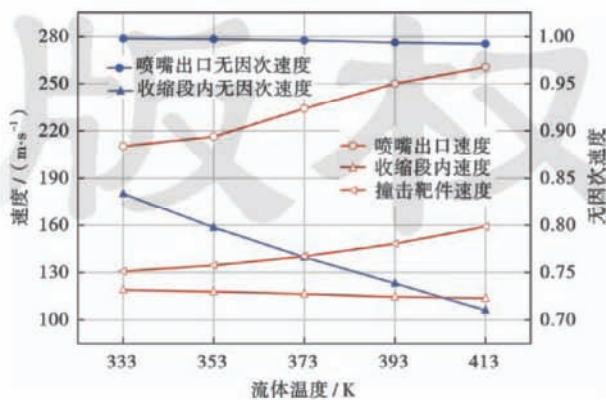


图 9 不同流体温度下计算域轴向位置上颗粒速度

Fig. 9 Particle velocity in axial directions of computed domain under different fluid temperatures

出口处流体速度增大 40.1 m/s,颗粒轴向速度增大为 39.0 m/s,是流体的 97.3%。此外,流体温度每升高 30°,颗粒撞击靶件速度平均增大 7.1 m/s,平均增大 5.0%,将有助于提高作业效率。

由超临界二氧化碳流体密度与黏度随温度的变化规律(图 10)可知,随着流体温度上升,超临界二氧化碳流体密度与黏度呈现出不同程度下降。喷出喷嘴后,由于焦汤效应,黏度再一次显著减小。分析认为,喷嘴内密度与黏度的下降是造成颗粒跟随加速能力下降的主要原因,同样是固液两相速度增大的原因,而喷嘴外黏度减小是颗粒撞击速度增大的原因。流体对颗粒的拖曳力减小、阻碍作用减弱,因此颗粒撞击靶件壁面速度显著增大。

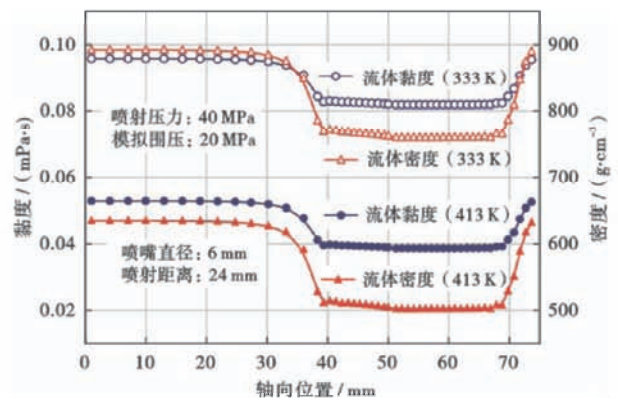


图 10 不同流体温度下超临界二氧化碳密度与黏度变化

Fig. 10 SC-CO₂ density and viscosity changes under different fluid temperatures

综上可知,流体温度升高对超临界二氧化碳射流中颗粒跟随加速过程造成一定影响,但对颗粒获得的喷射速度影响较小,撞击壁面速度则显著提高。因此,在该温度范围内,可有效形成超临界二氧化碳磨料射流并进行冲蚀切割作业,且温度越高作业效率越高。

2.4 不同磨料粒径条件下流场轴向位置颗粒速度对比分布

利用高压气射流、水射流进行抛光、刻蚀以及油气井喷射压裂增产作业时,磨料粒径具有较大的应用范围,因此本节研究了磨料颗粒直径对其在超临界二氧化碳射流中跟随运动的影响。分别为磨料颗粒选取设置了 0.1~2.4 mm 等多种直径,涵盖了喷射压裂作业中的常用粒径范围(20~70 目),其他参数不变。得到了如图 11、12 分别所示的喷嘴收缩段内与近壁面的颗粒轴向速度对比分布。

由图 11 可以看出,赋予相同初始速度、不同直径颗粒速度变化曲线有明显的间距,表明加速过程的快慢不同,直径小的颗粒则加速越快,但与温度变化规律

相似,最终均在喷嘴出口前不同的位置获得了近似相等的速度。数据显示,直径0.1 mm与2.4 mm的颗粒在 $x \approx 37.5$ mm处速度差最大,为91.1 m/s,而喷射速度分别为224.9 m/s和223.5 m/s,仅相差1.4 m/s。分析认为,颗粒直径越大,则表面积与质量越大,但随着面积增大的拖曳力不足以使其克服增大的惯性来获得相等的加速度,因此加速过程迟滞变缓。

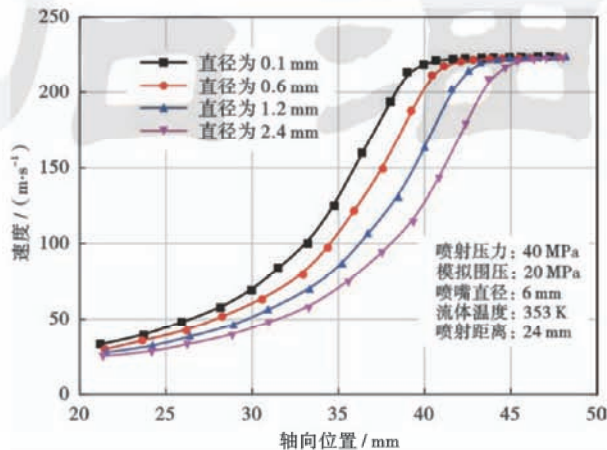


图11 不同磨料粒径条件下加速段内颗粒轴向速度分布

Fig. 11 Particle axial velocity distribution in the accelerating segment under different abrasive sizes

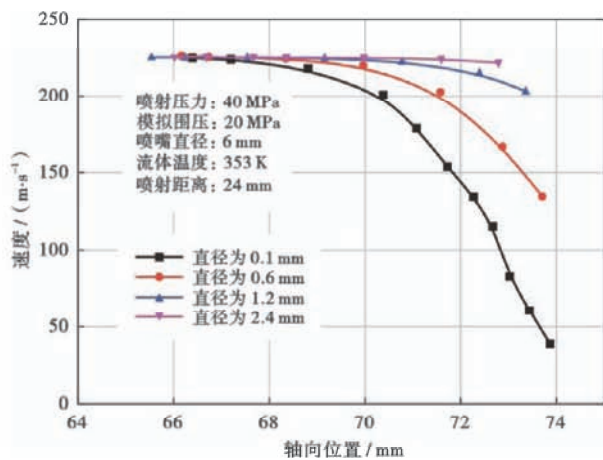


图12 不同磨料粒径条件下近壁面颗粒轴向速度分布

Fig. 12 Near-wall particle axial velocity distribution under different abrasive sizes

由图12可以看出,在 $x \approx 66.8$ mm位置处,4条曲线开始分散。由此可知,颗粒撞击靶件壁面速度显著不同。直径为2.4 mm与0.1 mm的颗粒撞击靶件壁面速度分别为221.5 m/s和38.8 m/s,差值达182.7 m/s。研究结果表明,颗粒质量越小则受到返回流阻力影响越大,速度衰减越严重,与之相反,直径大的颗粒则惯性与动量越大,受返回流影响越小,速度不易衰减,对靶面作用更强。

对于石英、陶粒等常用磨料材质,在压裂作业常用

粒径范围(20~70目)内形成磨料射流,磨料粒径增大将影响其在超临界二氧化碳射流中的跟随加速能力,如在一定喷嘴条件下获得充分加速,则喷射速度受影响较小,并可获得更高的撞击壁面速度。因此,在常用粒径范围内,超临界二氧化碳流体可高效携带磨料颗粒进行冲蚀切割作业,且粒径越大作业效率越高。

3 结论

(1) 喷嘴收缩段内,磨料颗粒与超临界二氧化碳射流运动规律相似,且两相喷射速度大致相等,表明颗粒在超临界二氧化碳射流中较高的跟随运动效率,因此可形成超临界二氧化碳磨料射流。

(2) 在所研究相同入口压力、入口质量流量及入口流速条件下,相比水和瓜儿压裂液等常用流体,超临界二氧化碳射流与颗粒间滑脱效应较强,颗粒跟随运动效率较低,但喷射速度与撞击壁面速度大,超临界二氧化碳磨料射流可获得更高的冲蚀切割效率。

(3) 随着流体温度升高,超临界二氧化碳流体与颗粒间滑脱速度增大,跟随加速效率下降,但因流体喷射速度提高以及流场中流体黏度减小,颗粒的喷射速度与撞击壁面速度均显著增大。

(4) 在常规粒径范围内(20~70目),超临界二氧化碳射流中颗粒在喷嘴收缩段内的滑脱速度随粒径增大而增大,加速变慢,但获得的喷射速度基本相等,且颗粒越大,所受流体阻力相对越小,撞击靶件速度越大。

符号注释: d_{jet} —喷嘴到冲击壁面的距离,即喷射距离,mm; p_{in} —数值模拟中入口压力,MPa; M_{in} —数值模拟中入口质量流量,kg/s; u_i —数值模拟中入口速度,m/s; p_{am} —数值模拟中出口压力,MPa; T_{am} —数值模拟中环境温度,K; u_{P0} —数值模拟中入口颗粒处轴向速度,m/s; v_{P0} —数值模拟中颗粒初始径向速度,m/s; M —数值模拟中颗粒质量流量,kg/s; Φ —流体状态参数的无量纲形式; Φ_0 — Φ 的理想部分; Φ_r — Φ 的残余部分; δ —研究点与临界点的密度比值; τ —研究点与临界点的温度比值; Z —二氧化碳流体压缩因子; ρ —流体密度,g/cm³; R —气体常数, $R = 8.314$ J/(mol·K); T —绝对温度,K; C_p —流体比热容,J/kg·K; C_J —焦耳-汤姆逊效应系数,无量纲; Δ —密度变化引起的参数变化量; Δ_c —临界条件附近环境压力与温度变化引起的参数变化量; μ —动力黏度,mPa·s; λ —导热系数,W/(m·K); t —时间,s; \mathbf{u} —速度矢量; u 、 v 和 w 均是 \mathbf{u} 在 x 、 y 和 z 方向上分量; p —流体微元体上的压力,N; S_i —动量守恒方程的广义源项在第 i 方向上分量; F_x 、 F_y 和 F_z —分别为微元体上的体力分量,N,本计算模

型中不考虑包括重力在内的诸多体力; S_T —黏性耗散项; k_h —流体的传热系数; k —流体湍动能, J ; u_i —时平均速度, m/s ; μ_t —湍动黏度, $mPa \cdot s$; σ_k 、 σ_ϵ —湍动能 k 和湍流耗散率 ϵ 对应的 Prandtl 数; G_k —平均速度梯度引起的湍动能 k 的产生项, J ; G_b —浮力引起的湍动能 k 的产生项, J ; ϵ —流体湍流耗散率; Y_M —可压湍流中脉动膨胀对总耗散率的贡献值; S_k 、 S_ϵ —定义源项; x_i 、 x_j —位移在第 i 、 j 方向上分量, m ; $C_{1\epsilon}$ 、 $C_{2\epsilon}$ 、 $C_{3\epsilon}$ —模型经验常数; x_k —平均运动轨迹长度, m ; C_μ —平均应变率与旋度的函数,在平衡边界层惯性底层为常系数; β —热膨胀系数; g_i —重力加速度在第 i 方向上分量, m/s^2 ; Pr_t —Prandtl 数; M_t —湍动 Mach 数; a —声速, m/s ; γ —绝热指数; F_{in} —颗粒运动惯性力, N ; d_p —颗粒直径, m ; ρ_p —颗粒密度, g/cm^3 ; u_p —射流颗粒轴向速度, m/s ; F_d —拖曳力, N ; F_r —摩擦曳力, N ; F_p —形体曳力, N ; C_D —曳力系数; A_p —颗粒表面积, m^2 ; F_g —颗粒所受重力, N ; g —颗粒所受重力加速度, m/s^2 ; F_{vm} —虚拟质量力, N ; V_p —颗粒体积, m^3 ; u_t —射流流体轴向速度, m/s 。

参 考 文 献

- [1] SALDUNGARAY P M, PALISCH T T. Hydraulic fracture optimization in unconventional reservoirs[R]. SPE 151128, 2012.
- [2] HUGHES J D. Energy: a reality check on the shale revolution [J]. Nature, 2013, 494(7437): 307-308.
- [3] BRINO A, NEARING B. New waterless fracking method avoids pollution problems, but drillers slow to embrace it [J]. Inside-Climate News, 2011, 6.
- [4] ROGALA A, KRZYSIEK J, BERNACIAK M, et al. Non-aqueous fracturing technologies for shale gas recovery [J]. Physicochemical Problems Mineral Processing, 2013, 49(1): 313-321.
- [5] GRUNDMANN S R, RODVELT G D, DIALS G A, et al. Cryogenic nitrogen as a hydraulic fracturing fluid in the Devonian shale [R]. SPE 51067, 1998.
- [6] 张晓明, 石万忠, 徐清海, 等. 四川盆地焦石坝地区页岩气储层特征及控制因素 [J]. 石油学报, 2015, 36(8): 926-939.
ZHANG Xiaoming, SHI Wanzhong, XU Qinghai, et al. Reservoir characteristics and controlling factors of shale gas in Jiaoshiba area, Sichuan Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(8): 926-939.
- [7] 杨正明, 刘学伟, 张仲宏, 等. 致密油藏分段压裂水平井注二氧化碳吞吐物理模拟 [J]. 石油学报, 2015, 36(6): 724-729.
YANG Zhengming, LIU Xuwei, ZHANG Zhonghong, et al. Physical simulation of staged-fracturing horizontal wells using CO₂ huff and puff in tight oil reservoirs [J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(6): 724-729.
- [8] 刘奎, 王宴滨, 高德利, 等. 页岩气水平井压裂对井筒完整性的影响 [J]. 石油学报, 2016, 37(3): 406-414.
LIU Kui, WANG Yanbin, GAO Deli, et al. Effects of hydraulic fracturing on horizontal wellbore for shale gas [J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(3): 406-414.
- [9] LI Gensheng, SHEN Zhonghou, HUANG Zhongwei, et al. Research and applications of novel jet techniques in well drilling, completion and fracturing [J]. Science Foundation in China, 2014, 22(2): 68-80.
- [10] HE Zhenguo, LI Gensheng, TIAN Shouceng, et al. SEM analysis on rock failure mechanism by supercritical CO₂ jet impingement [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2016, 146: 111-120.
- [11] 陶文铨. 数值传热学 [M]. 2 版. 西安: 西安交通大学出版社, 2001.
TAO Wenquan. Numerical heat transfer [M]. 2nd ed. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2001.
- [12] 康顺, 石磊, 戴丽萍, 等. CFD 模拟的误差分析及网格收敛性研究 [J]. 工程热物理学报, 2010, 31(12): 2009-2013.
KANG Shun, SHI Lei, DAI Liping, et al. Analyse of CFD simulation error and study of grid convergence [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2010, 31(12): 2009-2013.
- [13] 廖华林, 李根生, 牛继磊. 淹没条件下超高压水射流破岩影响因素与机制分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(6): 1243-1250.
LIAO Hualin, LI Gensheng, NIU Jilei. Influential factors and mechanism analysis of rock breakage by ultra-high pressure water jet under submerged condition [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(6): 1243-1250.
- [14] 韩布兴. 超临界流体科学与技术 [M]. 北京: 中国石化出版社, 2005: 2-27.
HAN Buxing. Supercritical fluid science & technology [M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2005: 2-27.
- [15] SPAN R, WAGNER W. A new equation of state for carbon dioxide covering the fluid region from the triple-point temperature to 1100 K at pressures up to 800 MPa [J]. Journal of Physical and Chemical Reference Data, 1996, 25(6): 1509-1596.
- [16] SPAN R. Multiparameter equations of state: an accurate source of thermodynamic property data [M]. Berlin Heidelberg: Springer, 2000: 15-56.
- [17] PENG Dingyu, ROBINSON D B. A new two-constant equation of state [J]. Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals, 1976, 15(1): 59-64.
- [18] 赵青, 李玉星, 李顺丽. 超临界二氧化碳管道杂质对节流温降的影响 [J]. 石油学报, 2016, 37(1): 111-116.
ZHAO Qing, LI Yuxing, LI Shunli. Influence of impurities in pipeline on the temperature drop of supercritical carbon dioxide throttling [J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(1): 111-116.
- [19] FENGHOUR A, WAKEHAM W A, VESOVIC V. The viscosity of carbon dioxide [J]. Journal of Physical and Chemical Reference Data, 1998, 27(1): 31-44.
- [20] VESOVIC V, WAKEHAM W A, OLCOWY G A, et al. The transport properties of carbon dioxide [J]. Journal of Physical and Chemical Reference Data, 1990, 19(3): 763-808.
- [21] BRUCATO A, GRISAFI F, MONTANTE G. Particle drag coef-

- ficients in turbulent fluids[J]. *Chemical Engineering Science*, 1998, 53(18): 3295-3314.
- [22] 王明波, 王瑞和, 陈炜卿. 单个磨料颗粒冲击岩石过程的数值模拟研究[J]. *石油钻探技术*, 2009, 37(5): 34-38.
WANG Mingbo, WANG Ruihe, CHEN Weiqing. Numerical simulation study of rock breaking mechanism and process under abrasive water jet[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2009, 37(5): 34-38.
- [23] 董长银, 高凯歌, 王鹏, 等. 低黏液体井筒携砂流动规律及特征流速实验[J]. *石油学报*, 2016, 37(10): 1280-1286.
DONG Changyin, GAO Kaige, WANG Peng, et al. Sand-carrying flow in low-viscosity wellbore fluid and characteristic flow velocities[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2016, 37(10): 1280-1286.
- [24] JUNKAR M, JURISEVIC B, FAJDIGA M, et al. Finite element analysis of single-particle impact in abrasive water jet machining[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2006, 32(7): 1095-1112.
- [25] 侯磊, 孙宝江, 蒋廷学, 等. 支撑剂在超临界二氧化碳中的跟随性计算[J]. *石油学报*, 2016, 37(8): 1061-1068.
HOU Lei, SUN Baojiang, JIANG Tingxue, et al. Calculation on the following performance of proppant in supercritical carbon dioxide[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2016, 37(8): 1061-1068.
- [26] 况雨春, 朱志错, 蒋海军, 等. 单粒子冲击破岩实验与数值模拟[J]. *石油学报*, 2012, 33(6): 1059-1063.
KUANG Yuchun, ZHU Zhipu, JIANG Haijun, et al. The experimental study and numerical simulation of single-particle impacting rock[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2012, 33(6): 1059-1063.
- (收稿日期 2016-10-19 改回日期 2017-02-22 编辑 宋宁)
- ~~~~~
- (上接第 452 页)
- [19] 朱文娟, 喻高明, 严维峰, 等. 油田经济极限井网密度的确定[J]. *断块油气田*, 2008, 15(4): 66-67.
ZHU Wenjuan, YU Gaoming, YAN Weifeng, et al. Determination of economic limit for well pattern density of oilfield[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2008, 15(4): 66-67.
- [20] 李敬松, 孙义新, 熊海灵, 等. 油田开发经济评价[M]. 北京: 石油工业出版社, 2000: 85-96.
LI Jingsong, SUN Yixin, XIONG Hailing, et al. Oilfield development economic evaluation [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2000: 85-96.
- [21] PRELICZ R M, FEARFIELD D, SOBERA M, et al. Identifying new opportunities through reservoir performance reviews and systematic benchmarking of TQ recovery [R]. SPE 172095, 2014.
- [22] 胡伟, 杨胜来, 李斯鸣, 等. 基于多层次模糊综合评价的剩余油分布研究方法[J]. *西南石油大学学报: 自然科学版*, 2015, 37(4): 22-28.
HU Wei, YANG Shenglai, LI Siming, et al. Application of multi level fuzzy comprehensive evaluation method in the research of remaining oil distribution in Xing 6 district[J]. *Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition*, 2015, 37(4): 22-28.
- [23] 任闽燕, 张仲平, 曹嫣媛, 等. 基于模糊评判的氮气泡沫调剖选并选层研究[J]. *西安石油大学学报: 自然科学版*, 2013, 28(4): 60-63.
REN Minyan, ZHANG Zhongping, CAO Yanbin, et al. Study on selection of well and stratum for nitrogen foam profile control based on fuzzy evaluation[J]. *Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science Edition*, 2013, 28(4): 60-63.
- [24] 刘春梅, 谭青. 模糊综合评判在油气勘探多学科指标评价预测中的应用-以新疆柴窝堡凹陷为例[J]. *石油实验地质*, 2014, 36(1): 106-109.
LIU Chunmei, TAN Qing. Application of Fuzzy Comprehensive evaluation in oil & gas exploration with multidisciplinary assessment & forecasting: a case study on Chaiwopu Sag in Xinjian[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2014, 36(1): 106-109.
- [25] 陈元千, 周翠. 线性递减类型的建立、对比与应用[J]. *石油学报*, 2015, 36(8): 983-987.
CHEN Yuanqian, ZHOU Cui. Establishment, comparison and application of the linear decline type[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2015, 36(8): 983-987.
- [26] 李洪兴, 汪群, 段钦治, 等. 工程模糊数学方法及应用[M]. 天津: 天津科学技术出版社, 1993.
LI Hongxing, WANG Qun, DUAN Qinzi, et al. Engineering fuzzy mathematics methods with applications[M]. Tianjin: Tianjin Science and Technology Press, 1993.
- [27] 梁保松, 曹殿立. 模糊数学及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 127-150.
LIANG Baosong, CAO Dianli. Fuzzy mathematics and its applications[M]. Beijing: Science Press, 2007: 127-150.
- [28] 常建娥, 蒋太立. 层次分析法确定权重的研究[J]. *武汉理工大学学报: 信息与管理工程版*, 2007, 29(1): 153-156.
CHANG Jing'e, JIANG Taili. Research on the weight of coefficient through analytic hierarchy process[J]. *Journal of Wuhan University of Technology: Information & Management Engineering*, 2007, 29(1): 153-156.
- [29] 李柏年. 模糊数学及其应用[M]. 合肥: 合肥工业大学出版社, 2007: 120-135.
LI Bonian. Fuzzy mathematics and its applications[M]. Hefei: Hefei University of Technology Publishing, 2007: 120-135.
- (收稿日期 2016-05-14 改回日期 2017-01-22 编辑 王培玺)