

文章编号:1673-5005(2016)06-0080-07

doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2016.06.010

液氮磨料射流流场特性及颗粒加速效果研究

黄中伟¹, 蔡承政^{1,2}, 李根生¹, 田守增¹

(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. 中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏徐州 221116)

摘要:采用计算流体力学方法,在考虑液氮物性变化以及液氮与磨料颗粒相互作用的基础上,模拟液氮磨料射流流场,并分析液氮射流对磨料颗粒的加速效果。结果表明:在相同喷嘴压降下,液氮磨料射流不仅具有比磨料水射流更高的射流速度和颗粒速度,而且能够在壁面上产生与水射流相当的射流冲击效果;液氮射流能够对颗粒产生较好的加速效果,最大颗粒速度随着喷嘴压降和喷嘴直径的增加而增大,随着颗粒直径的增加而降低;围压和颗粒初始速度对最大颗粒速度影响极小,在工程应用中可以忽略不计。

关键词:液氮;磨料射流;流场特性;颗粒加速

中图分类号:TE 377 **文献标志码:**A

引用格式:黄中伟,蔡承政,李根生,等.液氮磨料射流流场特性及颗粒加速效果研究[J].中国石油大学学报(自然科学版),2016,40(6):80-86.

HUANG Zhongwei, CAI Chengzheng, LI Gensheng, et al. Flow behavior and particle acceleration effect of abrasive liquid nitrogen jet[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2016, 40(6): 80-86.

Flow behavior and particle acceleration effect of abrasive liquid nitrogen jet

HUANG Zhongwei¹, CAI Chengzheng^{1,2}, LI Gensheng¹, TIAN Shouceng¹

(1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting in China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

2. State Key Laboratory for GeoMechanics and Deep Underground Engineering in China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: Abrasive particles can be added into liquid nitrogen to form an abrasive liquid nitrogen jet (ALNJ) for rock breaking. In this study, the flow behavior of the ALNJ was studied using the computational fluid dynamics method, considering the properties of liquid nitrogen and its interactions with abrasive particles. The acceleration effect of liquid nitrogen on particles was analyzed. The results show that, at the same nozzle pressure drop, the abrasive liquid nitrogen jet not only has greater jet and particle velocities than water jet, but also displays an equivalent jetting impact effect on the targeted wall. The liquid nitrogen jet can generate excellent acceleration effects on particles, and the maximum particle velocity increases with the increase of the nozzle pressure drop and nozzle diameter, but decreases with the increase of particle diameter. Confining pressure and initial particle velocity have little effect on particle acceleration, which can be neglected in the design of the ALNJ process.

Keywords: liquid nitrogen; abrasive jet; flow behavior; particle acceleration

在石油工程领域,磨料射流不仅是一项重要的射孔工艺,也是进行喷射压裂的关键技术和前期工序^[1],已经在射孔和压裂增产方面发挥了重要作

用^[2-3]。由于页岩气等非常规天然气储层质量较差,易受到外来流体的伤害,并且在开发过程中会消耗大量水资源^[4-6],导致以水基工作液为主的钻采技术难

收稿日期:2016-03-26

基金项目:国家自然科学基金项目(51374220,51604263);油气资源与探测国家重点实验室开放课题(PRP/open-1507);中国博士后科学基金项目(2016M590523)

作者简介:黄中伟(1972-),男,教授,博士,博士生导师,研究方向为油气钻完井和压裂增产。E-mail:huangzw@cup.edu.cn。

以满足非常规资源高效开发的需求^[7],须寻找新型流体替代常规工作液。随着钻采技术的快速发展,在20世纪90年代,液氮曾作为压裂液用于页岩和煤岩等储层压裂增产中^[8-9]。液氮温度极低(-195.56~-180.4℃),与储层接触时,会导致储层岩石温度急剧降低,从而促进岩石内部初始裂隙的扩展或在岩石内部产生新的破裂^[10-11]。探索使用液氮磨料射流进行射孔以及压裂作业对于解决非常规天然气开发存在的储层伤害和水资源过度消耗等问题具有重要意义。磨料射流将射流对靶件的冲击作用变成磨料对靶件的冲击、磨削和高速冲蚀作用,极大提高了射流的切割效率^[12]。该技术的关键在于,流体是否能够将其所携带的颗粒加速到一定的速度产生高速磨料射流。为了研究液氮磨料射流中液氮对颗粒的加速性能,笔者利用计算流体力学方法,模拟液氮磨料射流流场,并分析其流场特性以及射流对颗粒的加速效果,为该技术的现场应用提供理论指导。

1 计算流体力学模型

1.1 几何模型及边界条件

图1为液氮磨料射流冲击流场的二维几何模型,模型主要由喷嘴与外部冲击区域两部分组成。在射流冲击过程中高压液氮从喷嘴入口流入,然后

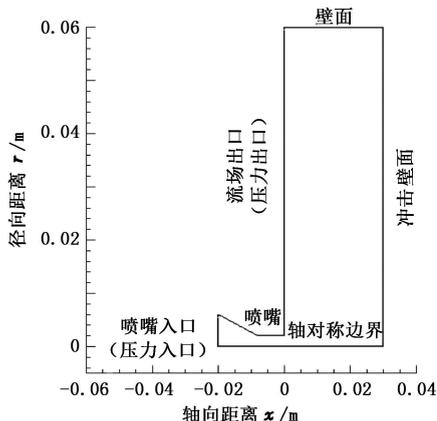


图1 液氮磨料射流冲击流场几何模型

Fig.1 Geometry model of flow field of liquid nitrogen abrasive jet

冲击到右侧壁面并流出流场。在计算时,将喷嘴入口设置为压力入口边界条件,流场出口设置为压力出口。出口压力等于环境围压,入口压力为围压与喷嘴压降之和。喷嘴以及流场区域的轴线设置为轴对称边界条件,其他边界为无滑移壁面边界条件。在建立几何模型时,选用目前水力喷射压裂常用的锥形喷嘴,该喷嘴由收缩段和直线段两部分组成^[13]。鉴于目前国内外尚未开展关于液氮喷射破

岩的研究工作,在设置几何参数时,参考已有的超临界CO₂射流破岩和射流冲击流场模拟的具体方案,将喷嘴的直线段长度分别设定为喷嘴出口直径的3.0倍和2.0倍,喷嘴入口直径为出口直径的3.0倍,喷嘴出口到冲击壁面的距离为喷嘴距^[14-15]。

1.2 数学模型及求解方法

液氮磨料射流不仅涉及传热和可压缩流动的问题,而且还须考虑液氮与颗粒之间的相互作用,涉及多相流动问题。除了须求解质量方程、动量方程和能量方程外,还须求解多相流动方程。在射流高速剪切作用下,喷嘴内外会产生湍流,采用标准k-ε模型进行求解^[16]。在液氮射流冲击过程中,温度和压力会影响液氮的密度、黏度等物性参数,而这些物性参数发生变化时又会反过来影响到整个射流流场。为了提高计算精度,在计算过程中需要对温度、压力以及液氮物性参数进行耦合计算。选择基于亥姆霍兹自由能的Span状态方程计算液氮的密度和等压比热容^[17]。根据亥姆霍兹自由能得到的N₂密度和等压比热容的表达式分别为

$$\rho(\delta, \tau) = \rho R T \left(1 + \delta \left(\frac{\partial \alpha'}{\partial \delta} \right)_{\tau} \right), \quad (1)$$

$$\frac{c_p(\delta, \tau)}{R} = -\tau^2 (\alpha''_{\tau\tau} + \alpha''_{\tau\tau}) + \frac{(1 + \delta \alpha'_\delta - \delta \tau \alpha'_{\delta\tau})^2}{1 + 2\delta \alpha'_\delta + \delta^2 \alpha''_{\delta\delta}}. \quad (2)$$

其中

$$\delta = \rho / \rho_c, \tau = T_c / T.$$

式中,ρ和ρ_c分别为密度和临界密度,kg/m³;T和T_c分别为温度和临界温度,K;R为比气体常数,0.2968 kJ/(kg·K);c_p为等压比热容,kJ/(kg·K);N₂的临界密度ρ_c为313.30 kg/m³,临界温度T_c为126.192 K;p为压力,kPa。

另外,液氮射流在运动过程中还受到周围流体的黏滞作用,而且流场温度分布受到流体热传导的影响。在计算过程中还须考虑液氮的黏度和导热系数变化。液氮的黏度和导热系数采用Lemmon和Jacobsen提出的计算模型进行计算,具体表达式^[18]为

$$\eta(\rho, T) = \eta_0(T) + \eta_R(\tau, \delta). \quad (3)$$

式中,η₀(T)为零密度极限值,仅受温度的影响;η_R(τ, δ)为残余项。

导热系数的表达式为

$$\lambda(\rho, T) = \lambda_0(T) + \lambda_R(\tau, \delta) + \lambda_c(\tau, \delta). \quad (4)$$

式中,λ₀(T)为零密度极限值;λ_R(τ, δ)为残余项;λ_c(τ, δ)为温度和压力在超临界附近时引起的增量。

由于磨料射流中颗粒体积分数一般小于10%,可选用离散相模型(discrete phase model)进行求

解^[19]。该模型对连续相(流体)在欧拉框架下求解 Navier-Stokes 方程,对磨料颗粒在拉格朗日框架下求解颗粒轨道方程,DPM 又被称为颗粒轨道模型。在离散项模型中,由于颗粒在流体内分布十分稀疏,可以认为颗粒周围完全被流体包裹,彼此不会相互接触,在计算过程中只须考虑流体与颗粒之间的相互作用即可。在计算时,首先忽略颗粒相的影响,采用 Navier-Stokes 方程、湍流方程以及液氮物性方程求解纯射流的流场;然后不考虑颗粒相和连续相的相互作用,计算颗粒轨迹和速度分布;最后考虑射流和颗粒之间的动量和能量交换作用,重新计算射流流场和修正后射流流场中的颗粒运动轨迹和速度分布。

2 液氮磨料射流流场特性

为了更好地分析液氮磨料射流的流场特性,分别模拟液氮磨料射流和磨料水射流的流场。在计算中,将喷嘴压降和围压均设置为 30 MPa,液氮温度为 100 K。所选用的喷嘴出口直径为 4 mm,喷距为

30 mm。当温度为 100 K 时,水以固态的形式存在,无法产生射流。考虑到水的物性受温度和压力影响较小,可将其流动假设为等温流动,忽略能量方程以及水的物性变化。水的物性参数为:密度 998.2 kg/m³,黏度 10.03×10⁻⁴ Pa·s,导热系数 0.6 W/(m·K),等压比热容 4.182 kJ/(kg·K)。在求解离散相(磨料颗粒)时,选取磨料颗粒直径为 0.6 mm,密度为 2800 kg/m³,颗粒在喷嘴入口处的速度为 20 m/s,质量流量为 0.4 kg/s,颗粒形状为球形。

2.1 射流速度场

图 2 为模拟得到的液氮射流与水射流的速度云图。可以看出高压流体经过喷嘴加速后形成高速射流,高速射流冲击到右侧壁面后轴向速度立即衰减为零,并沿壁面产生漫流,最后流体从流场出口返出。通过对比液氮射流和水射流的速度云图可以看出,在相同条件下,液氮射流速度要大于水射流速度。当液氮射流中混有一定的磨料颗粒时,可加快磨料颗粒的冲击速度,提高射孔效率。

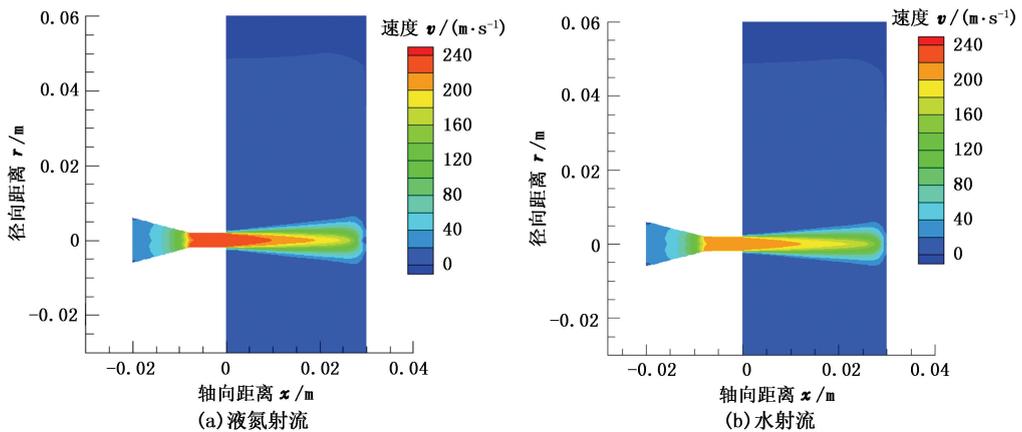


图 2 液氮射流与水射流速度分布

Fig. 2 Velocity distribution of liquid nitrogen jet and water jet

提取流场的速度数据绘制如图 3 所示的沿轴向方向的射流速度分布曲线。在相同喷嘴压降下,液氮轴线射流速度均大于水的轴线射流速度。例如在 30 MPa 的喷嘴压降条件下,液氮最大射流速度为 229.49 m/s,水的最大射流速度为 210.20 m/s,液氮最大射流速度比水高 9.18%。

2.2 射流压力场

图 4 为液氮射流和水射流的压力分布云图。从图 4 可以看出,当喷嘴收缩段内的高压流体进入喷嘴直线段时,压力会迅速降低,此时部分压能转换成射流动能,形成高速射流。当高速射流喷射到冲击壁面时,射流速度迅速降低,此时部分动能转换成压能,引起射流冲击壁面附近压力迅速上升,即对壁面

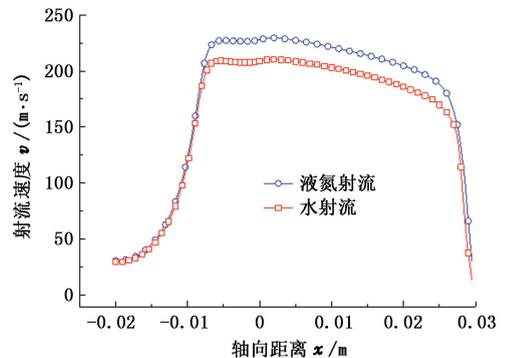


图 3 液氮射流与水射流轴线速度分布

Fig. 3 Axial velocity distribution of liquid nitrogen jet and water jet

产生了明显的冲击作用。在冲击壁面上,射流轴线

上压力最高,越向两侧压力越小,直至与围压持平。

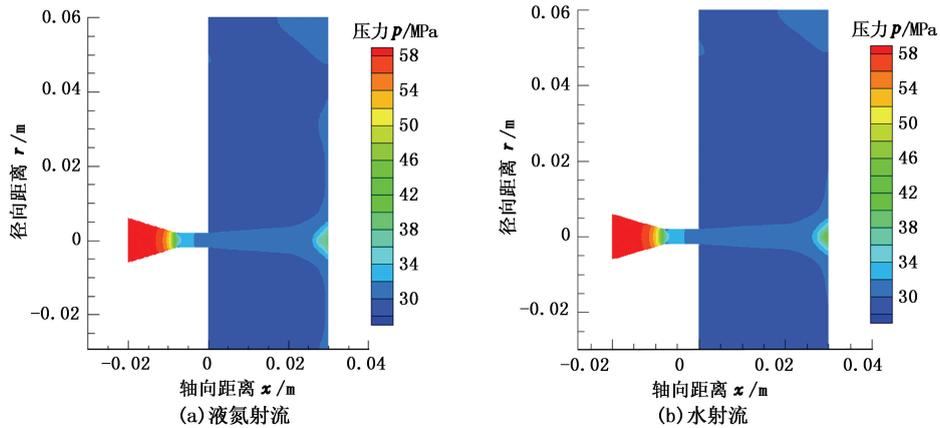


图4 液氮射流与水射流压力分布

Fig. 4 Pressure distribution of liquid nitrogen jet and water jet

图5为模拟得到的液氮射流和水射流的轴线压力分布曲线。从图5可以看出,当围压一定时,高压流体流经喷嘴后其压力迅速衰减到围压水平。在相同条件下,液氮射流和水射流轴线压力变化规律基本一致,两者在壁面上产生的冲击压力也基本相同。这说明在相同的喷嘴压降下,液氮射流能够获得与水射流相当的射流冲击效果。

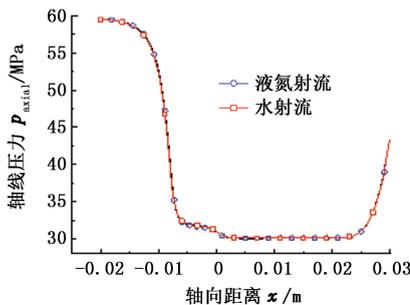


图5 液氮射流与水射流轴线压力分布
Fig. 5 Axial pressure distribution of liquid nitrogen jet and water jet

2.3 颗粒速度分布

在实际水力喷射射孔或水力喷射压裂过程中,由于油管内径较大,管内流体的流速较低,磨料颗粒很难在油管获得较高的速度,磨料加速主要在喷嘴内的收缩段、直线段以及射流核心区完成^[20]。如图6所示,在喷嘴内部,磨料颗粒的速度迅速增加,但是颗粒速度并没有在喷嘴,内部达到最大值,而是在距离喷嘴出口一定位置处才达到最大值。这是因为在喷嘴外部的射流核心区内,流体仍然具有较高速度,颗粒和流体之间依然具有较大的速度差,颗粒仍然会被继续加速。

图6中颗粒在喷嘴收缩段时速度增加十分迅速,当颗粒到达喷嘴收缩段的末端时,速度约为最大

速度的70%。这是因为喷嘴收缩段的截面积不断减小,导致流体的速度迅速增加(图3),使颗粒能够在较短的距离内获得较大的速度。从图3可知,在喷嘴直线段,流体速度达到了最大值。但是在喷嘴外部的射流核心区域,颗粒和流体依然存在速度差,颗粒的加速过程在射流核心区域内持续进行。在相同喷嘴压降下,液氮中的颗粒速度大于水中的颗粒速度。这进一步证明当使用液氮作为磨料射流介质时,颗粒可获得更高的冲击速度。

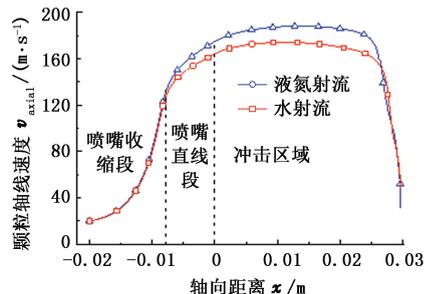


图6 液氮射流与水射流中颗粒轴线速度分布
Fig. 6 Axial velocity distribution of particles in liquid nitrogen jet and water jet

综合上述分析可知,在磨料射流中颗粒能够获得较高冲击速度的本质在于颗粒与流体之间存在一定的速度差,导致颗粒产生相对于射流向后运动的趋势。在颗粒与射流的相互作用中,射流对颗粒的相对向后运动起到阻碍作用,从而在颗粒表面产生作用力,使颗粒获得加速度,假设加速距离足够长,颗粒的速度会不断趋近于射流速度。在实际喷射过程中由于加速距离有限,且射流速度不断衰减,颗粒很难被充分加速到接近流体的速度。为了进一步对比液氮和水这两种射流介质对颗粒的加速效果,模拟5种喷嘴压降条件下的液氮磨料射流和磨料水射

流流场,并计算颗粒和射流速度。设定轴线上颗粒速度与射流最大速度的比值为颗粒无量纲速度,颗粒最大速度与射流最大速度比值即为颗粒最大无量纲速度。颗粒无量纲速度能够反映流体介质对颗粒加速的能力,无量纲速度越大,表明流体对颗粒的加速能力越强。图7为以液氮和水为介质的两种磨料射流的颗粒最大无量纲速度对比结果。在液氮射流中,颗粒最大无量纲速度仅比水射流低约1%,而液氮射流速度要比水射流高约10%。最终液氮射流的颗粒最大速度比水中颗粒速度高7%~8%。由此可见,液氮射流中颗粒最大速度高于水射流的最重要原因在于高压液氮流经喷嘴后能够获得更高的射流速度。

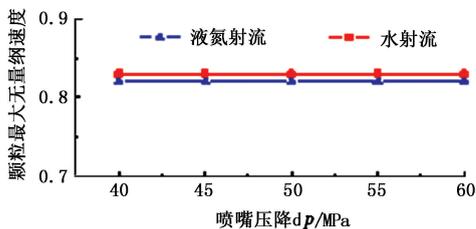


图7 颗粒最大无量纲速度

Fig.7 The maximum dimensionless velocities of particle

3 液氮射流对颗粒加速效果影响因素

磨料颗粒的冲击速度是衡量磨料射流切割破碎能力的重要参数,磨料颗粒的冲击速度越大,磨料射流的工作能力越强。在进行影响因素分析时,以第2节的算例作为基准算例,在分析某个参数对颗粒冲击速度影响时,保持其他参数不变,通过调节该参数模拟不同条件下的液氮磨料射流流场,得到颗粒冲击速度随该参数的变化规律。

3.1 喷嘴压降

喷嘴压降为喷嘴入口与出口处的压力差,是表征射流动能的重要参数。图8为颗粒最大速度和射流最大速度与喷嘴压降之间的关系曲线。随着喷嘴压降增加,颗粒最大速度和射流最大速度均增加。这主要是因为喷嘴压降越大,液氮射流速度越大,射流对颗粒的作用力也越大。在现场施工过程中,可在工作管柱承压范围内适当提高喷嘴压降,以提高液氮磨料射流的工作效率。

3.2 喷嘴直径

图9为颗粒最大速度及射流最大速度与喷嘴直径的关系曲线。二者均随着喷嘴直径的增加而增加。这主要是因为当颗粒质量流量一定时,喷嘴直径越大,液氮的体积流量越大,射流的速度越高,对颗粒的

加速作用越强,颗粒最终获得的速度越高。

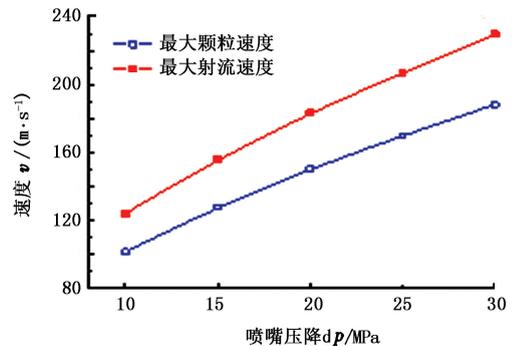


图8 喷嘴压降对液氮射流及颗粒最大速度的影响

Fig.8 Effect of nozzle pressure drop on the maximum velocity of particles and liquid nitrogen jet

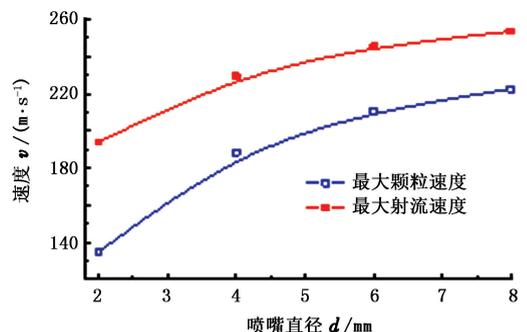


图9 喷嘴直径对液氮射流及颗粒最大速度影响

Fig.9 Effect of nozzle diameter on the maximum velocity of particles and liquid nitrogen jet

3.3 围压

在喷射过程中,围压主要指喷嘴外部流场压力。在实际井下工况中,磨料射流均在高围压条件下进行工作,而且井深越大,射流所受到的围压越大。为了确定围压对液氮磨料射流颗粒速度分布的影响,模拟不同围压条件下的液氮磨料射流流场,结果如图10所示。随着围压的增加,颗粒以及射流的最大速度基本不变,表明围压对颗粒冲击速度影响很小。这是因为围压主要决定整个射流流场的压力水平,并不会影响射流动能,因此对液氮射流的速度影响也极小。

3.4 颗粒初始速度

在实际井下水力喷砂射孔或水力喷射压裂作业中,常采用连续油管或普通油管作为作业管柱^[21-22]。由于管内流体的速度随着油管尺寸的变化而变化,因此当颗粒到达井底的喷嘴时,会具有不同的初始速度。计算不同初始速度时的液氮磨料射流流场,结果如图11所示。颗粒初始速度对液氮磨料射流中颗粒及射流的最大速度影响极小,这是因为颗粒速度的增加主要由颗粒与液氮射流之间的速度差引起。如图3所示,当流体进入喷嘴收缩段后,

速度会迅速增加,在进入直线段时,射流速度达到最大值。这说明颗粒初始速度对颗粒与流体之间的速度差影响极小,颗粒的最终速度主要受喷嘴加速作用的影响。

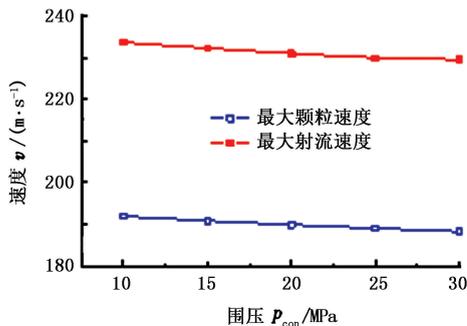


图 10 围压对液氮射流及颗粒最大速度影响

Fig. 10 Effect of confining pressure on the maximum velocity of particles and liquid nitrogen jet

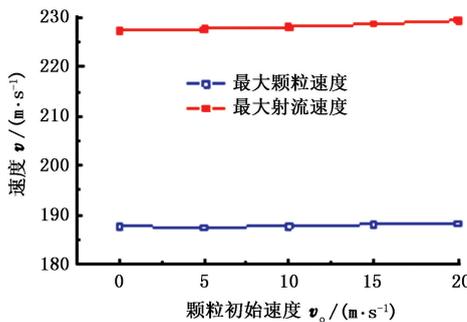


图 11 颗粒初始速度对液氮射流及颗粒最大速度影响

Fig. 11 Effect of particle initial velocity on the maximum velocity of particles and liquid nitrogen jet

3.5 颗粒直径

在实际作业中,选用的磨料颗粒直径过大或过小都会影响磨料射流最终切割效果。如图 12 所示,随着颗粒直径的增加,最大颗粒速度不断降低,而最大射流速度基本没有变化。这说明颗粒直径不会影响液氮射流与颗粒之间的初始速度差。但是当颗粒密度一定时,颗粒直径越大,单个颗粒的质量越大,在相同的射流作用力下,小直径颗粒更容易被加速

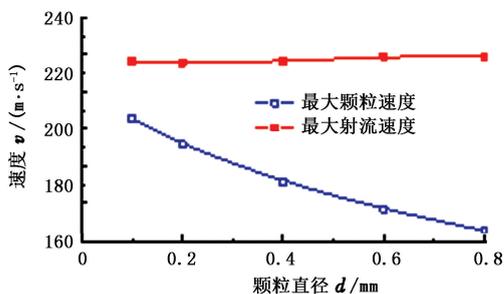


图 12 颗粒直径对液氮射流及颗粒最大速度影响

Fig. 12 Effect of particle diameter on the maximum velocity of particles and liquid nitrogen jet

到更高的速度;颗粒直径过小会降低磨料的撞击和磨削效果,影响液氮磨料射流最终的切割能力。建议参考前期研究成果选择粒径 0.4 ~ 0.6 mm 的磨料^[22],以保证液氮磨料射流的最佳切割效果。

4 结论

(1)在喷嘴的节流作用下,高压液氮能够形成有效的高速射流。在相同喷嘴压降条件下,液氮射流具有比水射流更高的速度,而且能够在壁面上产生与水射流相当的冲击压力。

(2)高压液氮流经喷嘴后,能够将其携带的磨料颗粒加速到较高速度,对颗粒产生较好的加速效果。在相同条件下,液氮磨料射流中的颗粒冲击速度大于水射流中的颗粒冲击速度。

(3)液氮磨料射流中最大颗粒速度随着颗粒直径的增大而降低,随着喷嘴压降和喷嘴直径的增加而增大。在条件允许情况下,可尽量提高喷嘴压降和选择大尺寸喷嘴,并合理控制磨料颗粒的粒度,提高液氮磨料射流的冲击效果。

(4)颗粒初始速度与围压对颗粒速度分布基本没有影响,在实际应用中可以忽略,这使液氮磨料射流具有更广泛的适用性。

参考文献:

- [1] LI G, HUANG Z, TIAN S, et al. Research and application of water jet technology in well completion and stimulation in China [J]. *Petroleum Science*, 2010, 7(2): 239-244.
- [2] LI G, SHEN Z, HUANG Z, 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.
- [3] 黄中伟,李根生,史怀忠,等. 围压下磨料射流喷射套管及灰岩实验研究[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2014, 38(6): 85-89.
HUANG Zhongwei, LI Gensheng, SHI Huaizhong, et al. Experimental study on abrasive water jet blasting casing and limestone under ambient pressures [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2014, 38(6): 85-89.
- [4] ANDERSON R L, RATCLIFFE I, GREENWELL H C, et al. Clay swelling: a challenge in the oilfield [J]. *Earth-Science Reviews*, 2010, 98(3/4): 201-216.
- [5] BAHRAMI H, REZAAE R, CLENNELL B. Water blocking damage in hydraulically fractured tight sand gas reservoirs: an example from Perth Basin, Western Australia

- [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2012, 88/89:100-106.
- [6] ARTHUR J D, BOHM B K, CORNUE D. Environmental considerations of modern shale gas development [R]. SPE 122931, 2009.
- [7] 李根生,王海柱,沈忠厚,等.超临界 CO₂ 射流在石油工程中应用研究与前景展望[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2013, 37(5):76-80.
LI Gensheng, WANG Haizhu, SHEN Zhonghou, et al. Application investigations and prospects of supercritical carbon dioxide jet in petroleum engineering [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2013, 37(5):76-80.
- [8] MCDANIEL B W, GRUNDMANN S R, KENDRICK W D, et al. Field applications of cryogenic nitrogen as a hydraulic fracturing fluid[R]. SPE 38623, 1997.
- [9] 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.
- [10] 蔡承政,李根生,黄中伟,等.液氮压裂中液氮对岩石破坏的影响试验[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2014, 38(4):98-103.
CAI Chengzheng, LI Gensheng, HUANG Zhongwei, et al. Experimental study on effect of liquid nitrogen on rock failure during cryogenic nitrogen fracturing [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2014, 38(4):98-103.
- [11] CAI C, LI G, HUANG Z, et al. Experimental study of the effect of liquid nitrogen cooling on rock pore structure [J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2014, 21:507-517.
- [12] 曲海.水力喷射分段压裂机理及参数优化研究[D].北京:中国石油大学,2011.
QU Hai. Mechanisms and parameter optimization for multistage hydrjet-fracturing [D]. Beijing: China University of Petroleum, 2011.
- [13] 李根生,黄中伟,田守崧,等.水力喷射压裂理论与应用[M].北京:科学出版社,2011:197-200.
- [14] 杜玉昆,王瑞和,倪红坚,等.超临界二氧化碳射流流破岩试验[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2012, 36(4):93-96.
DU Yukun, WANG Ruihe, NI Hongjian, et al. Rock-breaking experiment with supercritical carbon dioxide jet [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2012, 36(4):93-96.
- [15] 程宇雄,李根生,沈忠厚,等.超临界二氧化碳射流冲击压力参数影响规律[J]. *石油学报*, 2014, 35(4):765-770.
CHENG Yuxiong, LI Gensheng, SHEN Zhonghou, et al. Impact pressure and parametric sensitivity analysis of supercritical CO₂ jet [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2014, 35(4):765-770.
- [16] FRANZ D. Fluid mechanics: an introduction to the theory of fluid flows [M]. Berlin: Springer, 2008:576-585.
- [17] SPAN R, LEMMON E W, JACOBSEN R T, et al. A reference equation of state for the thermodynamic properties of nitrogen for temperatures from 63.151 to 1 000 K and pressures to 2200 MPa [J]. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 2000, 29(6):1361-1433.
- [18] LEMMON E W, JACOBSEN R T. Viscosity and thermal conductivity equations for nitrogen, oxygen, argon, and air [J]. *International Journal of Thermophysics*, 2004, 25(1):21-69.
- [19] 王福军.计算流体动力学分析:CFD 软件原理与应用[M].北京:清华大学出版社,2004:196-207.
- [20] 李宝玉,郭楚文.用于煤矿安全切割的前混合磨料射流加速机理研究[J]. *中国安全科学学报*, 2005, 15(4):52-55.
LI Baoyu, GUO Chuwen. Study on acceleration mechanism of abrasive particles of DIA jet in coalmine safe cutting [J]. *China Safety Science Journal*, 2005, 15(4):52-55.
- [21] LI G, HUANG Z, TIAN S, et al. Investigation and application of multistage hydrjet-fracturing in oil and gas well stimulation in China [R]. SPE 131152, 2010.
- [22] 李根生,牛继磊,刘泽凯,等.水力喷砂射孔机理实验研究[J]. *石油大学学报(自然科学版)*, 2002, 26(2):31-34.
LI Gensheng, NIU Jilei, LIU Zekai, et al. Experimental study on mechanisms of hydraulic sand blasting perforation for improvement of oil production [J]. *Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science)*, 2002, 26(2):31-34.

(编辑 李志芬)