

淹没水射流关键参数对天然气水合物沉积物 冲蚀体积的影响规律研究

靳成才^{1,2}, 陈 晨^{1,2,3}, 潘栋彬^{1,2}, 朱 颖^{1,2},
李曦桐^{1,2}, 钟秀平^{1,2}, 张 晗^{1,2}, 张 颖^{1,2}

(1. 吉林大学建设工程学院, 吉林 长春 130026; 2. 自然资源部复杂条件钻采技术重点实验室, 吉林 长春 130026;
3. 超硬材料国家重点实验室, 吉林 长春 130026)

摘要: 高压水射流技术具有工作介质来源广泛与环保等优点, 能够用于海底天然气水合物储层破碎。本文运用 LS-DYNA 有限元程序对淹没状态下高压水射流对海洋天然气水合物沉积物破碎过程进行数值模拟, 研究了射流速度、喷嘴直径、靶距、入射角度 4 项关键参数对含水合物沉积物冲蚀体积的影响, 得出以下主要结论: 含水合物沉积物破碎需要满足射流速度大于临界流速; 随着射流速度的增加冲蚀体积逐渐增大; 喷嘴直径的增加会导致沉积物径向冲蚀体积的增大, 从而使总体冲蚀体积增大; 靶距的增加会使水射流在水域运动过程中能量损失增大, 导致冲蚀体积的减小; 在喷嘴入射角度增大过程中冲蚀体积先增大后减小最后趋于稳定, 当入射角度为 10° 时冲蚀体积能够达到最大值。

关键词: 水射流参数; 天然气水合物沉积物; 流固耦合; 数值模拟; 冲蚀体积

中图分类号: P634.1; TE21 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2019)05-0001-07

Influence of key parameters of submerged water jets on the erosion volume of natural gas hydrate sediments

JIN Chengcai^{1,2}, CHEN Chen^{1,2,3}, PAN Dongbin^{1,2}, ZHU Ying^{1,2},
LI Xitong^{1,2}, ZHONG Xiuping^{1,2}, ZHANG Han^{1,2}, ZHANG Ying^{1,2}

(1. College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun Jilin 130026, China;
2. Key Laboratory of Drilling and Exploitation Technology in Complex Conditions of Ministry of Natural Resources, Changchun Jilin 130026, China;
3. State Key Laboratory of Superhard Materials, Changchun Jilin 130026, China)

Abstract: The high-pressure water jet technology provides many advantages such as a wide range of working mediums, environmental-soundness, and can be used to break the submarine gas hydrate formations. In this paper, the LS-DYNA finite element program is used to simulate the fragmentation process of submarine gas hydrate formations with high-pressure water jets under the submerged condition. The effects of four key parameters (jet velocity, nozzle diameter, target distance and incident angle) on the erosion volume of hydrate formations are studied. The following conclusions are drawn: the requirement that jet velocity is higher than the critical velocity needs to be met for fragmentation of hydrate sediments; the erosion volume gradually increases with the increase of jet velocity; the increase of nozzle diameter will lead to the increase of the radial erosion volume of formations, hence the overall ero-

收稿日期: 2019-03-28; **修回日期:** 2019-04-17 **DOI:** 10.12143/j.tkgc.2019.05.001

基金项目: 国家自然科学基金面上项目“高压低温水射流作用下海底天然气水合物储层破岩过程与机理研究”(编号:41672361); 吉林省科技发展计划项目, 国际科技合作项目“海洋天然气水合物置换开采关键技术研究”(编号:20170414044GH)

作者简介: 靳成才, 男, 汉族, 1994 年生, 吉林大学在读硕士研究生, 从事天然气水合物钻采研究工作, 吉林省长春市朝阳区西民主大街 938 号, 7688816@qq.com。

通信作者: 陈晨, 男, 汉族, 1965 年生, 副院长, 教授, 博士生导师, 从事岩土工程钻凿技术、新能源钻采技术研究工作, 吉林省长春市朝阳区西民主大街 938 号, chenchen@jlu.edu.cn。

引用格式: 靳成才, 陈晨, 潘栋彬, 等. 淹没水射流关键参数对天然气水合物沉积物冲蚀体积的影响规律研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2019, 46(5): 1-7.

JIN Chengcai, CHEN Chen, PAN Dongbin, et al. Influence of key parameters of submerged water jets on the erosion volume of natural gas hydrate sediments[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019, 46(5): 1-7.

sion volume; the increase of target distance will increase the energy loss of water jets in the process of water movement, leading to the decrease of the erosion volume; the erosion volume will increase first and then decrease with the increase of nozzle incidence angle, eventually becoming stable. When the incident angle is 10° , the erosion volume can reach the maximum value.

Key words: water jet parameters; gas hydrate sediments; fluid-solid coupling; numerical simulation; erosion volume

0 引言

天然气水合物又名“可燃冰”，是轻烃、 H_2S 等气体与水在低温高压条件下发生反应所产生的固态结晶物质^[1-2]，这种能源在燃烧过程中能够产生的能量密度是常规石油的十余倍，且能源储量巨大，国

务院已经在 2017 年 11 月将其列入我国第 173 个矿种^[3]。陆域天然气水合物多分布在我国冻土地带，而海洋天然气水合物多分布于满足其赋存条件的海洋底部沉积物当中，全球范围内天然气水合物分布如图 1 所示^[4-5]。

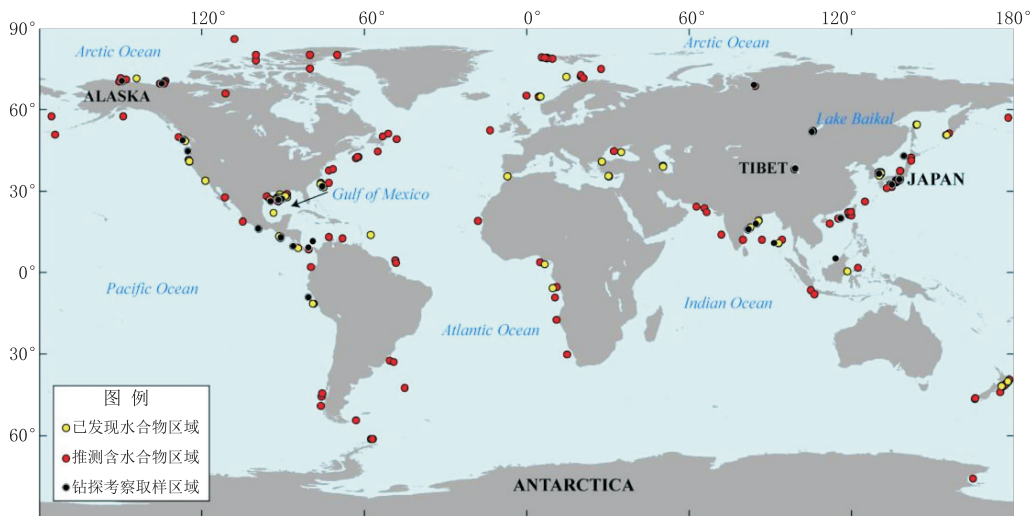


图 1 全球天然气水合物分布情况

Fig.1 Global distribution of natural gas hydrates

天然气水合物作为 21 世纪最具潜力的新型能源，其开采方式已成为国内外研究热点^[6]。目前普遍的开采方式原理均为改变天然气水合物的赋存状态，使其分解并对所产生的天然气资源及水资源进行采集。高压水射流技术具有工作介质来源广泛、易于控制且不会对环境产生污染等优势，已经被运用于钻孔水力开采和煤矿开采工程等领域中^[7-10]，2017 年 5 月该技术也在我国南海神狐海域天然气水合物试采工程中得到应用^[11]。衡量高压水射流技术开采天然气水合物效率的核心指标为含水合物沉积物的冲蚀体积，因此本文运用 LS-DYNA 有限元程序结合 ALE 算法对不同参数条件下含水合物沉积物在高压水射流作用下的冲蚀体积变化规律进行研究。

1 ALE 算法简介

ALE 算法全称 Arbitrary Lagrangian-Eulerian

Method，由 Noh 和 Hirt 于 1974 年提出^[12]，该算法在保留 Lagrangian 算法对物质边界特征描述方式的基础上，能够发挥 Euler 算法的优势，防止由网格发生大变形而产生的计算结果误差^[13]。在采用 ALE 算法坐标系中，物质能够在网格间自由流动，二者处于相互独立的状态。

1.1 ALE 控制方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \rho \frac{\partial v_i}{\partial x_i} + w_i \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial v_i}{\partial t} + \rho w_i \frac{\partial v_i}{\partial x_j} = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho f_i \quad (2)$$

$$\rho \frac{\partial e}{\partial t} = \sigma_{ij} \frac{\partial v_i}{\partial x_j} - \frac{\partial q_i}{\partial x_j} - \rho w_i \frac{\partial e}{\partial x_i} \quad (3)$$

式中： ρ ——流体的密度， kg/m^3 ； t ——时间， s ； v ——流体速度分量， m/s ； i, j ——坐标轴方向； x_i, x_j ——流体在不同坐标轴方向上的位移分量， m ； σ_{ij} ——柯西应力； f_i ——单位质量流体的体力， N ； w_i ——相对速度，即物质和网格运动速度之差， m/s ； q_i ——热通

量, W/m^2 ; e ——内能密度, J/m^3 [14]。

1.2 ALE 算法流程

ALE 算法流程如图 2 所示,在模型建立完毕后首先要开启拉格朗日计算步,然后进行模型边界及其内部节点的移动,在移动过程中流体单元的密度、能量和动量等均会产生变化,因此需要对这些物理量进行计算及运输,接着对流体单元各节点的速度进行更新,最终通过对流算法来进行对流计算,计算完成后便可得到运算结果[15]。

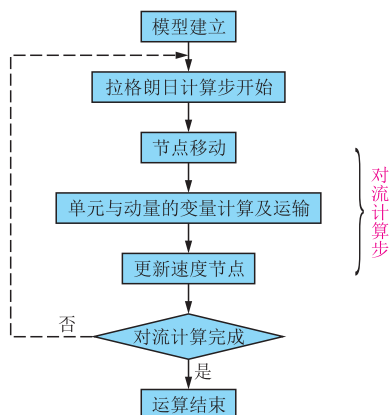


图 2 ALE 算法流程图

Fig.2 ALE algorithm flow chart

2 模型的建立

2.1 模型几何结构

本文所建立的水域模型的长与宽均为 4.2 cm,其高度会因喷射靶距的不同而发生改变,含水合物沉积物模型几何大小为 4 cm×4 cm×5 cm,其边界与水域边界相隔 0.1 cm,射流源设置为高度 0.05 cm 的圆柱体,其直径与高压水射流的喷嘴直径大小相等。为了提升计算效率,本文选择对 1/4 模型进行运算,如图 3 所示,将所得运算结果再进行对称

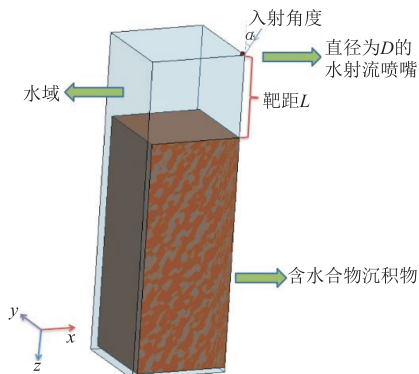


图 3 数值模拟模型

Fig.3 Numerical simulation model

处理,从而获得完整模型的运算结果。

模型几何条件确定后,通过映射网格划分法对模型划分网格。由于本文所研究的沉积物在淹没水射流作用下的破碎过程具备明显的局部效应,为了提高计算效率在划分网格时对网格进行局部加密,即水域网格大小沿射流中心至水域四周逐渐增大,如图 4 所示,含水合物沉积物网格由普通的八节点砖单元组成。模型单元总数会因靶距与喷嘴直径的变化而产生波动,以靶距 $L = 1.8$ cm,喷嘴直径 $D = 1.2$ mm 的工况为例,此时模型包含的单元总数为 414234。

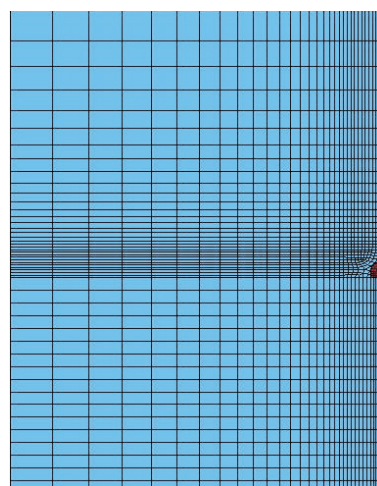


图 4 模型网格划分结果

Fig.4 Meshing results

在 ALE 算法中,为了实现沉积物单元和水域单元之间的耦合,首先需要在建模过程中设置二者网格节点重合,然后调用 * CONSTRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID 关键字,与此同时为了使模型内部力的传递过程正常进行,选择罚函数来对二者进行约束。

为使 1/4 模型经对称后能正确的还原成为完整模型,需要对模型的边界条件进行设置。首先应设置 1/4 模型的 xoz 面上 y 方向位移以及在 $yo z$ 面上 x 方向位移均为零,从而防止沉积物 1/4 模型发生侧向变形;接着设置水域以及沉积物的两个侧面以及其底面为无反射边界[16],用于模拟实际环境中模型所处的半无限大空间;最后将沉积物的底面固定,即将其各个方向位移均设置为 0。

2.2 流体模型的定义

本文通过 * MAT_NULL 来进行水的定义并进行参数的赋值,通过查阅相关文献[17-19]最终确定水

的参数如表1所示。其本构方程通过调用 *EOS_GRUNEISEN 状态方程来确定,表达方式为:

$$p = \frac{\rho_0 C^2 \mu \left[1 + \left(1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) \mu - \frac{\delta}{2} \mu^2 \right]}{\left[1 - (S_1 - 1) \mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2} \right] + (\gamma_0 + \delta \mu) E} \quad (4)$$

式中: p ——材料受到的压力,Pa; ρ_0 ——初始状态下水的密度, kg/m^3 ; C ——冲击波速度与质点速度关系曲线的纵轴截距, m/s ; μ ——粘性系数, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; γ_0 ——Gruneisen 系数; δ ——Gruneisen 系数的一阶修正系数,本文中取值为0; S_1 、 S_2 、 S_3 ——关系曲线拟合系数; E ——单位体积的流体初始状态具有的内能,J。

表1 水的参数

Table 1 Water parameters

密度 $\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	曲线截距 $C/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	关系曲线拟合系数 S_1	关系曲线拟合系数 S_2	关系曲线拟合系数 S_3	Gruneisen 系数 γ_0	初始内能 $E/10^{-6} \text{J}$
1.05	1647	1.921	0.096	0	0.35	2.86

2.3 沉积物模型的定义

本文通过常用于模拟土壤的 *MAT_FHWA_SOIL 材料进行含水合物沉积物的定义及赋值。与地层中的原始土壤相比,以分散和填隙等方式赋存着天然气水合物的沉积物材料自身粘聚力 c 、内摩擦角 φ 和固结强度等力学参数将会增高。Drucker-Prager 弹塑性理论作为 *MAT_FHWA_SOIL 材料模型建立的基础,在运算过程中能够对固体单元的失效情况进行判断^[20],因此能够准确模拟沉积物的破碎效果,同时根据 LS-DYNA 软件的运行结果所反应的失效单元个数能够计算得出沉积物失效的总体积,即在水射流作用下沉积物的破碎体积。通过查阅相关文献^[21-26]可得沉积物模型的参数选取如表2所示。

表2 沉积物的参数

Table 2 Sediment parameters

密度 $\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	体积模量 K/GPa	剪切模量 G/GPa	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	粘聚力 c/kPa	含水率 $w/\%$
2.0	9.3	4.2	12.5	45	50

3 数值模拟结果及分析

3.1 射流速度对冲蚀体积的影响

本文选取冲蚀时间 $t = 900 \mu\text{s}$ 时沉积物的冲蚀

体积进行研究。图5展示了喷嘴直径 D 和入射角度 α 保持不变时,3种不同喷射靶距条件下射流速度与冲蚀体积间的关系。由图5可知,不同靶距条件下冲蚀体积随射流速度的变化规律相同,当射流速度较小时冲蚀体积为0,当射流速度大于某一值时沉积物才会产生破碎,该值可以称作沉积物的临界流速。临界流速会随喷射靶距的增加而增大,当喷射靶距 L 从1.2 cm增加至2.4 cm时,临界流速从约40 m/s增加至60 m/s。

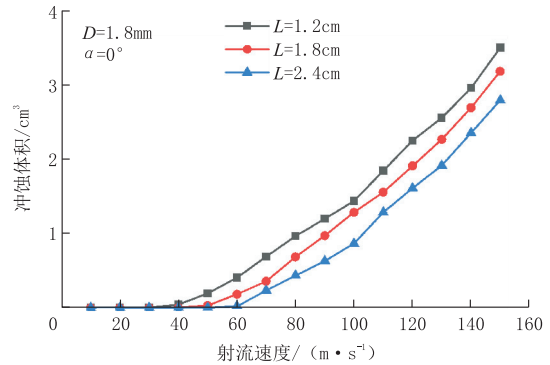


图5 射流速度对冲蚀体积的影响

Fig.5 Effect of jet velocity on erosion volume

当射流速度大于临界流速之后,冲蚀体积会随射流速度的增加而逐渐增大,射流速度的增大也会使冲蚀体积的增加速度有小幅提升,但总体来看二者关系接近于线性变化。分析认为射流速度越大,水射流在从喷嘴喷出后具有的能量就越高,因此当水射流接触到沉积物后,沉积物所产生的冲蚀体积便会越大。

不同射流速度时沉积物应力云图如图6所示,本文在模拟过程中选取的质量、长度与时间的基本单位分别为 g 、 cm 和 μs ,经推导可得应力云图中数值单位为 10^{11}Pa 。由图6可知,随着射流速度增大,破碎坑深度明显增加,破碎坑的孔径增加幅度较小。沉积物在水射流作用下的冲蚀体积可分为轴向冲蚀体积和径向冲蚀体积,由图可知射流速度对轴向冲蚀体积的影响更加显著,因此若在实际工程中增加射流速度,不仅能使更大体积沉积物破碎,还能获得更深层处的水合物资源。通过应力云图可知沉积物在冲蚀过程中应力集中区位于破碎坑边缘以及破碎坑正下方处,且射流速度越大时应力集中越显著。

3.2 喷嘴直径对冲蚀体积的影响

图7展示了冲蚀体积与喷嘴直径的关系,由图7

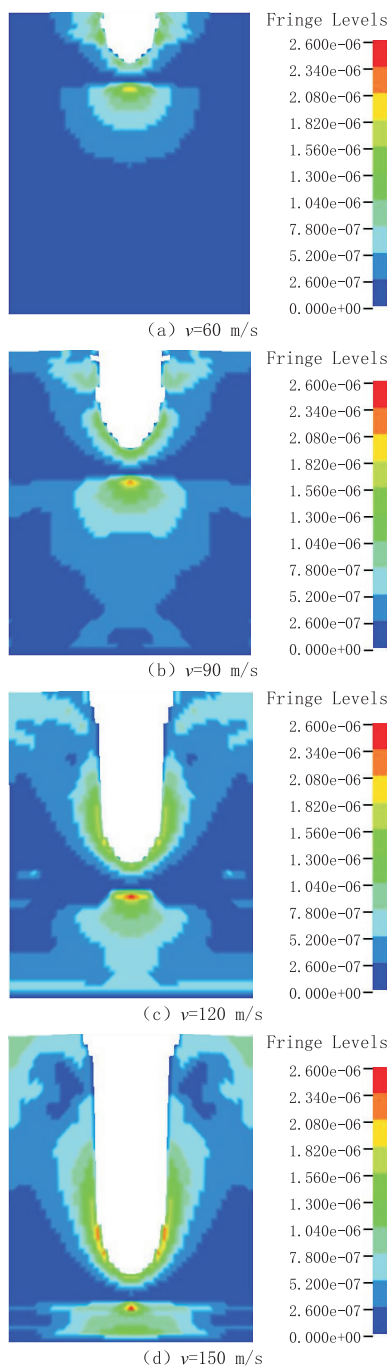


图 6 不同射流速度时沉积物应力云图

Fig.6 Sediment stress nephogram at different jet velocities

可知,随着喷嘴直径的增加冲蚀体积不断增大,分析认为,喷嘴直径越大,水射流从喷嘴射出时的横截面积也会越大,水射流具备的初始能量越大,并且当水射流刚开始接触到沉积物表面时,形成的初始破碎坑的直径也会越大,因此冲蚀体积也会增加。由图中曲线可知,喷嘴直径越大曲线的斜率越大,即冲蚀体积的增加速度越快。分析认为产生这种现象的原因

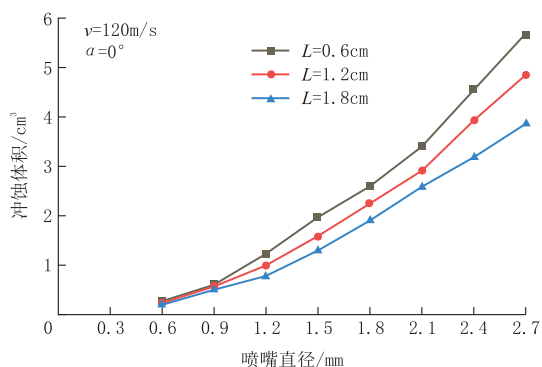


图 7 喷嘴直径对冲蚀体积的影响

Fig.7 Effect of nozzle diameter on erosion volume

是水射流截面面积与喷嘴直径的平方呈线性关系,若将喷嘴直径增加相同的值,喷嘴直径较大时喷嘴面积增加的值越多,初始破碎坑的直径的增量也会随之增大。对比不同靶距条件下的冲蚀体积变化规律可知,喷射靶距越小冲蚀体积的增加速度越快,且当喷嘴直径很小时,3 种情况下冲蚀体积均约等于零,分析认为喷嘴直径较小时水射流所具有的能量很低,很难对沉积物进行大体积的冲蚀破碎。

3.3 靶距对冲蚀体积的影响

由图 8 可知,当喷射靶距从 0.2 cm 增大至 0.4 cm 时,沉积物的冲蚀体积会产生大幅下降,在此之后随着喷射靶距的逐渐增大冲蚀体积会产生相对比较缓慢的下降趋势。对于不同喷嘴直径工况下的高压水射流此规律依然保持不变。分析认为,喷射靶距越大,水射流从喷嘴喷出直至接触到沉积物并产生碰撞这一阶段中水射流的运动路径越长,而水射流在水域中运动时,虽然水射流和水域材料参数一致,但二者存在速度差,该速度差便会产生阻碍水

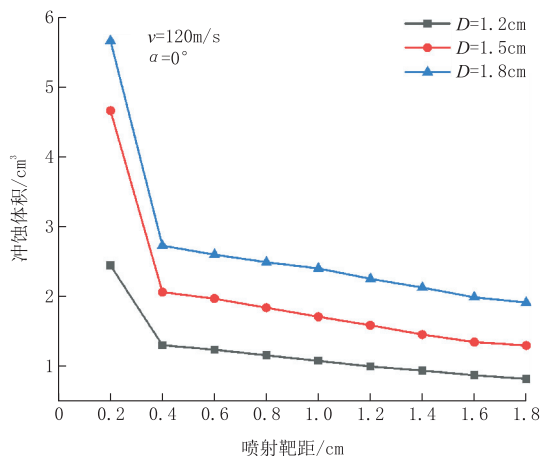


图 8 靶距对冲蚀体积的影响

Fig.8 Effect of target distance on erosion volume

射流朝向沉积物流动趋势的粘性阻力,在接触到沉积物之前,粘性阻力一直在做负功,且喷射靶距越大,粘性阻力所做的负功越多,当水射流接触到沉积物时所具有的能量越低,沉积物的冲蚀体积便会越小。

3.4 入射角度对冲蚀体积的影响

本文所探讨的入射角度定义为射流方向和沉积物模型轴线间的夹角,由图9可知,随着入射角度的增大,冲蚀体积呈现先增大后减小最后基本保持不变的趋势,当入射角度为 10° 时,冲蚀体积达到最大值。总体来看,对比于前3种水射流参数,冲蚀体积因入射角度变化而产生的改变最小。分析认为,当入射角度增大时,水射流运动到沉积物表面的路程长度会增加,在某种程度上相当于靶距的增加,这种情况会导致冲蚀体积下降,然而当入射角度越大时,水射流与沉积物的接触面积也会相应增大,这相当于喷嘴直径的增加,因此会导致冲蚀体积的增大。综合上述两项观点可得出结论,在入射角度小于 10° 时,随着喷射靶距的增加,水射流和沉积物接触面积增加对冲蚀体积的影响大于水射流运动路程变大而产生的影响,当入射角度达到 10° 之后,二者对冲蚀体积的影响基本持平,因此冲蚀体积基本保持稳定。

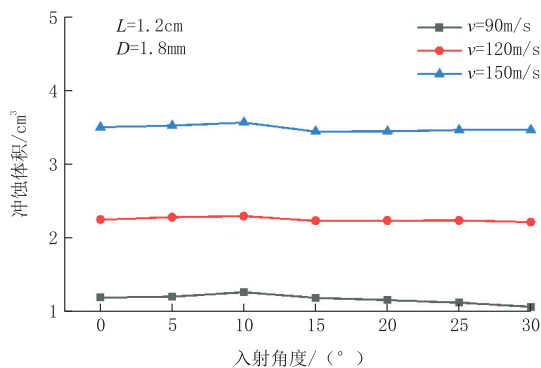


图9 入射角度对冲蚀体积的影响

Fig.9 Effect of incident angle on erosion volume

4 结论

(1)在淹没水射流作用下含水合物沉积物破碎存在临界流速,沉积物发生破碎的必要前提是射流流速大于临界流速,此后随着射流速度的增大,沉积物冲蚀体积逐渐增加。

(2)喷嘴直径对沉积物冲蚀体积的影响主要表现在径向冲蚀体积的变化上,随着喷嘴直径的增加

径向冲蚀体积不断增大,因此总体上冲蚀体积不断增大,且喷嘴直径越高冲蚀体积增加速率越快。

(3)随着靶距的增大,冲蚀体积整体上呈现减小的趋势,当靶距从0.2 cm增大至0.4 cm时冲蚀体积会产生大幅下降,此后冲蚀体积随靶距的增加而衰减的速度比较平缓。沉积物破碎需要的临界流速和靶距有关,靶距越大,沉积物破碎所需的临界速度越高。

(4)当入射角度从 0° 增大到 10° 时,冲蚀体积逐渐增大,当入射角度超过 10° 后,冲蚀体积大小会减小至 0° 时的状态并基本保持不变,因此在实际工程中选择水射流的入射角度为 10° 能够使开采效率达到最高。

参考文献(References):

- [1] 杨林, 赵大军, 郭威, 等. 天然气水合物泥浆制冷系统的野外试验研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2013, 40(12): 25-27, 31.
YANG Lin, ZHAO Dajun, GUO Wei, et al. Field test study on gas hydrate mud refrigeration system[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2013, 40(12): 25-27, 31.
- [2] Qorbani K, Kvamme B, Kuznetsova T. Using a reactive transport simulator to simulate CH_4 production from bear island basin in the Barents Sea utilizing the depressurization method[J]. Energies, 2017, 10: 187.
- [3] 中国能源编辑部. 可燃冰成新矿种 将加快推进产业化[J]. 中国能源, 2017, 39(11): 1.
Energy of China. A new mineral "gas hydrate" will accelerate industrialization[J]. Energy of China, 2017, 39(11): 1.
- [4] Yang L, Chen C, Jia R, et al. Influence of reservoir stimulation on marine gas hydrate conversion efficiency in different accumulation conditions[J]. Energies, 2018, 11(2): 339.
- [5] 李冰. 祁连山冻土区天然气水合物试采数值模拟及置换开采实验研究[D]. 吉林长春: 吉林大学, 2016.
LI Bing. Numerical simulations of production trial and experimental research on replacement method of gas hydrate in Qilian mountain permafrost[D]. Changchun Jilin: Jilin University, 2016.
- [6] Moon C, Taylor P C, Rodger P M. Clathrate nucleation and inhibition from a molecular perspective[J]. Revue Canadienne De Physique, 2003, 81: 451-457.
- [7] 薛胜雄. 高压水射流技术工程[M]. 安徽合肥: 合肥工业大学出版社, 2006.
XUE Shengxiong. High pressure waterjet technology & engineering[M]. Hefei Anhui: Hefei University of Technology Press, 2006.
- [8] 孙家骏. 水射流切割技术[M]. 江苏徐州: 中国矿业大学出版社, 1992.
SUN Jiajun. Water jet cutting technology[M]. Xuzhou Jiang-

- su: China University of Mining and Technology Press, 1992.
- [9] 高文爽.油页岩钻孔水力开采实验台设计及孔底流场数值模拟研究[D].吉林长春:吉林大学, 2011.
GAO Wenshuang. Research on fluid transportation of bottom-hole of oil shale and its laboratory bench design[D]. Changchun Jilin; Jilin University, 2011.
- [10] 温继伟.油页岩钻孔水力开采射流装置的数值模拟与实验研究[D].吉林长春:吉林大学, 2014.
WEN Jiwei. Numerical simulation and experimental research on the jet devices for hydraulic borehole mining of oil shale [D]. Changchun Jinlin; Jilin University, 2014.
- [11] 周守为,陈伟,李清平,等.深水浅层非成岩天然气水合物固态流化试采技术研究及进展[J].中国海上油气, 2017, 29(4): 1-8.
ZHOU Shouwei, CHEN Wei, LI Qingping, et al. Research on the solid fluidization well testing and production for shallow non-diagenetic natural gas hydrate in deep water area[J]. China Offshore Oil and Gas, 2017, 29 (4): 1-8.
- [12] 朱伯芳.有限单元法原理与应用[M].北京:中国水利电力出版社, 1979.
ZHU Bofang. The finite element method theory and applications[M]. Beijing: China Water Conservancy and Electric Power Press, 1979.
- [13] 时党勇,李裕春,张胜民.基于 ANSYS/LS-DYNA 8.1 进行显式动力分析[M].北京:清华大学出版社, 2005.
SHI Danyong, LI Yuchun, ZHANG Shengmin. Explicit dynamic analysis based on ANSYS/LS-DYNA 8.1[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.
- [14] 孙琦,周军,林鹏.基于 LS-DYNA 的弹体撞水过程流固耦合动力分析[J].系统仿真学报, 2010, 22(6): 1498-1501.
SUN Qi, ZHOU Jun, LIN Peng. Dynamic analysis of fluid-structure interaction for water impact of projectile using LS-DYNA[J]. Journal of System Simulation, 2010, 22(6): 1498-1501.
- [15] 黄飞.水射流冲击瞬态动力特性及破岩机理研究[D].重庆:重庆大学, 2015.
HUANG Fei. On the transient dynamics of water jet impacting target and the mechanism of water jet breaking rock[D]. Chongqing: Chongqing University, 2015.
- [16] 刘佳亮,司鹤,张宏.淹没状态下高压水射流破岩效率分析[J].中国安全科学学报, 2012, 22(11): 23-29.
LIU Jialiang, SI Gu, ZHANG Hong. Study on breaking rock efficiency of submerged water jet[J]. China Safety Science Journal, 2012, 22 (11): 23-29.
- [17] Liu S, Liu Z, Cui X, et al. Rock breaking of conical cutter with assistance of front and rear water jet[J]. Tunnelling & Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research, 2014, 42(5): 78-86.
- [18] 倪红坚,王瑞和.高压水射流射孔过程及机理研究[J].岩土力学, 2004, 25(S1): 29-32.
NI Hongjian, WANG Ruihe. Study on progress and mechanism of high pressure water jet perforation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(S1): 29-32.
- [19] 倪红坚,王瑞和,张延庆.高压水射流作用下岩石破碎机理及过程的数值模拟研究[J].应用数学和力学, 2005, 26(12): 1445-1452.
NI Hongjian, WANG Ruihe, ZHANG Yanqing. Numerical simulation study on rock breaking mechanism and process under high pressure water jet[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2005, 26(12): 1445-1452.
- [20] 顾磊,倪福生,张浩.基于 ALE 方法的射流冲刷砂土和黏土的数值计算[J].科学技术与工程, 2017, 17(11): 103-107.
GU Lei, NI Fusheng, ZHANG Hao. Numerical simulation of water-jet-erosion of sand and clay using ALE method[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(11): 103-107.
- [21] Clayton C R I, Priest J A, Best A I. The effects of disseminated methane hydrate on the dynamic stiffness and damping of a sand[J]. Géotechnique, 2005, 55(6): 423-434.
- [22] 宁伏龙,吴能友,李实,等.基于常规测井方法估算原位水合物储集层力学参数[J].石油勘探与开发, 2013, 40(4): 507-512.
NING Fulong, WU Nengyou, LI Shi, et al. Estimation of in-situ mechanical properties of gas hydrate-bearing sediments by well logging[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(4): 507-512.
- [23] Luo T, Song Y, Zhu Y, et al. Triaxial experiments on the mechanical properties of hydrate-bearing marine sediments of South China Sea[J]. Marine & Petroleum Geology, 2016, 77: 507-514.
- [24] Lu Y, Huang F, Liu X, et al. On the failure pattern of sandstone impacted by high-velocity water jet[J]. International Journal of Impact Engineering, 2015, 76: 67-74.
- [25] Momber A W. Wear of rocks by water flow[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2004, 41(1): 51-68.
- [26] 张旭辉,王淑云,李清平.天然气水合物沉积物力学性质的试验研究[J].岩土力学, 2010, 31(10): 3069-3074.
ZHANG Xuhui, WANG Shuyun, LI Qingping. Experimental study of mechanical properties of gas hydrate deposits[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(10): 3069-3074.

(编辑 韩丽丽)