



耙头高压冲水喷嘴流场数值模拟及分析

陈 浩^{1,2}, 孙守胜^{1,2}, 郭志勇^{1,2}

(1. 中交天津航道局有限公司, 天津 300461; 2. 天津市疏浚工程技术企业重点实验室, 天津 300457)

摘要: 针对耙吸挖泥船耙头高压冲水喷嘴流场, 采用 CFD 技术进行喷嘴淹没射流数值模拟计算。分析不同喷嘴直径、不同出口射流速度、不同耙距及不同射流喷射角度条件下的射流压力。其他参数不变的情况下, 泥面所受到的压力随射流速度的提高而增大、随喷嘴直径增大而略微增加、随耙距增大而减小。喷射角度为 90°、60° 和 45° 时, 同等射流速度下喷射角度为 90° 时泥面受到的压力值最大, 但从破土量角度来看, 60° 为最佳喷射角度。

关键词: 耙吸挖泥船; 高压冲水系统; 喷嘴; 流场数值模拟

中图分类号: U 616

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)02-0202-07

Numerical simulation and analysis of flow field in high-pressure flushing nozzle of drag head

CHEN Hao^{1,2}, SUN Shou-sheng^{1,2}, GUO Zhi-yong^{1,2}

(1.CCCC Tianjin Dredging Co., Ltd., Tianjin 300461, China;

2.Tianjin Key Laboratory for Dredging Engineering Enterprises, Tianjin 300457, China)

Abstract: Aiming at the flow field in the high-pressure flushing nozzle of the drag head on trailing suction hopper dredgers, this paper conducted the numerical simulation of the submerged jet of the nozzle by CFD technology. The jet pressures under different nozzle diameters, exit jet velocities, target distances, and jet angles are analyzed. When the other parameters remain unchanged, the pressure on the mud surface increases with the rise in the jet velocity, slightly increases with the enlargement of nozzle diameter, and decreases with the increase in target distance. When the jet angles are 90°, 60°, and 45°, the pressure on the mud surface is the largest under 90° at the same jet velocity, while 60° is the best jet angle in terms of soil breaking amount.

Keywords: trailing suction hopper dredger; high-pressure flushing system; jet nozzle; numerical simulation of flow field

高压冲水在市政和煤矿行业应用较为广泛, 一般用来清理市政污泥、开挖电缆沟槽或采掘煤矿。随着疏浚行业对高压冲水技术研究的逐步开展, 出现了一些应用高压冲水来破土的机具, 并且取得了较好的效果, 各大疏浚公司均在自己的耙吸挖掘机具上应用了该技术。荷兰 IHC 公司率先将高压冲水应用在耙头上, 提高了耙吸挖泥船疏挖一些难挖土质的施工效率。近些年来, 由于底泥疏挖愈发困难, 各大公司相继开展了各类相

关研究, 如冲水破土试验研究、冲水性能数值仿真分析等, 均是验证高压冲水破土的机理和真实效果。

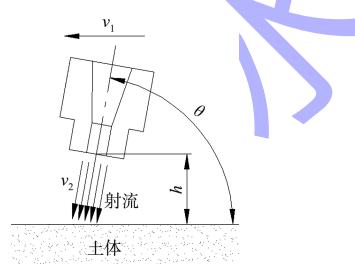
关于高压冲水技术的相关研究, 田忠^[1]通过试验研究和数值模拟的方式对射流的冲击压强进行了研究; 林风等^[2]研究耙头水箱的入流形式、内部流场和喷嘴出流对高压冲水效率的影响; 树伟等^[3]开展高压冲水喷嘴的安装位置和射流方向的理论研究和模型试验, 提高了喷嘴射流的破土

能力; 沈伟平等^[4]通过改进耙头高压冲水, 提高耙头疏挖黄骅航道板结粉土施工效率。

本文通过数值模拟的方法, 分析在淹没情况下喷嘴出口射流的压强变化情况, 为喷嘴的设计提供一定理论参考。

1 耙头高压冲水喷嘴

耙吸挖泥船耙头上配置有高压冲水系统, 该系统由高压水泵、管路、水箱和喷嘴组成。其中喷嘴为耙头上重要的辅助挖掘设备, 其内部流经有一定压力的高速射流。喷嘴过流面积较小, 通过喷嘴将水的压力势能转换为速度动能, 形成较高流速的喷射水流冲刷耙头底部泥床, 达到液化、疏松泥土的目的, 增加耙头破土量, 降低耙头挖掘阻力, 提高耙吸挖泥船施工生产效率。喷嘴直径、耙距、喷射角度和射流速度与水经过喷嘴喷出后冲刷土体的压力之间存在怎样的关系、对冲刷效果产生怎样的影响, 这些问题对喷嘴的设计具有重要的指导意义。一般针对耙吸挖泥船施工而言, 其高压冲水所关注的主要变量参数见图1。



注: v_1 为喷嘴移动速度; v_2 为射流速度; θ 为喷嘴对地角度; h 为耙距。

图1 耙头喷嘴高压冲水变量参数

2 二维造型与数值计算模拟

2.1 数值模拟计算方法及模型参数

为了提高计算效率, 同时考虑喷嘴流态的对称性, 采用二维对称面技术进行数值模拟。计算选取3种直径($d=10, 16, 20\text{ mm}$)喷嘴作为数值模型, 喷嘴进出口前后设置一定大小的水域来减小数值模拟误差。变量参数为喷嘴对地角度、耙距、喷嘴直径和射流速度。喷嘴流场计算见图2。为了能准确模拟出喷嘴流场, 建立模型时, 在喷嘴进

口外流场区域(A区域)做加大处理, 模拟安装喷嘴的水箱; B区域为喷嘴, 按照实际尺寸进行建模, 为了简化计算, 取喷嘴对称的一半进行模拟; 在喷嘴出口外流场区域(C区域)也进行了加大处理, 模拟耙腔内或耐磨块处敞开水域; h 为喷嘴距离泥面距离, 按照软件计算距离泥面一定距离的淹没射流压力。

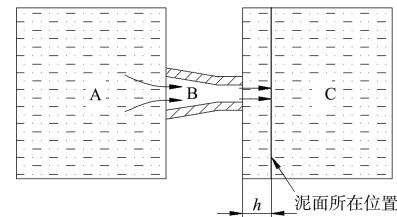


图2 喷嘴流场计算

2.2 二维建模及网格划分

建立喷嘴和周围水体二维网格, 喷嘴进口水域为 $50\text{ mm} \times 50\text{ mm}$, 喷嘴出口水域为 $150\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ 。采用非结构网格进行网格划分, 网格总数量为81 972, 见图3。

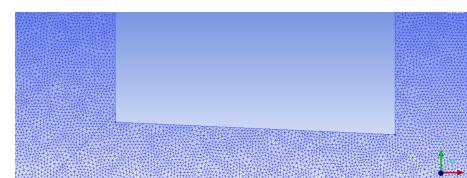


图3 计算流场局部网格

2.3 数值模拟计算控制方程

高压冲水喷嘴外的流场属于定常不可压缩黏性流动, 其N-S方程为:

连续性方程

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

动量守恒方程

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} - \frac{\partial(U_i U_j)}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) \quad (2)$$

式中: t 为时间; ρ 为密度; ν 为运动黏度; U_i 、 U_j 为瞬时速度分量; x_i 、 x_j 为空间坐标($i=1, 2, 3$ 和 $j=1, 2, 3$ 分别代表 x, y, z); p 为压力^[5]。

在SST $k-\omega$ 湍流模型中, 假定湍动黏度 μ_t 及湍动能 k 与湍动频率 ω 之间的关系为 $\mu_t = \rho \frac{k}{\omega}$, 在对

其进行一定的限制后，可得相应的 k 方程和 ω 方程：

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + U_i \frac{\partial(\rho k)}{\partial x_i} = P_k - \frac{\rho k^{\frac{3}{2}}}{I_{k-\omega}} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\rho v + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + u_i \frac{\partial(\rho \omega)}{\partial x_i} &= C_\omega P_\omega - \beta_\omega \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\rho v + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \right] + \\ 2\rho(1-F_1) \frac{1}{\sigma_{\omega 2}} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \end{aligned} \quad (4)$$

式中：湍动黏度可以表示为 $\mu_t = \frac{\rho \alpha_1 k}{\max(\alpha_1 \omega, SF_2)}$ ；

P_k 和 P_ω 为湍流生成项。

在 k 方程耗散项中的湍流尺度参数 $I_{k-\omega}$ 的表达式为：

$$I_{k-\omega} = \frac{k^{1/2}}{\beta_k \omega} \quad (5)$$

式中： β_k 为模型常数，取 0.09。

2.4 边界条件与求解方法

假定研究的流体近似为不可压缩流体，周围流场为静止流场，周围流体为水，流体为连续介质。模型入口为速度入口，出口为自由出流。方程离散方式为有限体积法，速度与压力耦合方法选择 SIMPLE 算法，梯度项差分方法采用 Least Squares Cell Based 方法，压力项差分方法采用 Standard 方法，动量项、湍动能项、湍流耗散项和能量项均采用 Second Order Upwind 方法。采用压 力速度耦合的半隐式求解，选择标准 $k-\omega$ 湍流模型。

3 数值计算结果与分析

3.1 喷嘴无移动情况下数值计算结果与分析

1) 第 1 组数值模拟的工况为 3 种喷嘴直径、5 种喷嘴出口射流速度下出口压力值，见表 1。

由表 1 可知，在喷嘴射流进口速度相同的情况下，喷嘴出口直径越大则泥面受到的压力越大。经过计算得到，当喷嘴出口直径不变的情况下，当射流速度由 36 m/s 增大到 45 m/s 时，泥面受到的压力值增大 56.4%；当射流速度由 45 m/s 增大到 60 m/s 时，泥面受到的压力值增大 77.7%；当射流速度由 60 m/s 增大到 70 m/s 时，泥面受到的

压力值增大 36%；当射流速度由 70 m/s 增大到 80 m/s 时，泥面受到的压力值增大 30.6%。

表 1 3 种喷嘴直径下不同射流速度喷嘴出口压力

喷嘴直径/mm	喷射角度/(°)	靶距/mm	射流速度/(m·s⁻¹)	是否淹没射流	到泥面压力/MPa
10	90	0	36	是	0.648
10	90	0	45	是	1.014
10	90	0	60	是	1.801
10	90	0	70	是	2.450
10	90	0	80	是	3.204
16	90	0	36	是	0.652
16	90	0	45	是	1.018
16	90	0	60	是	1.810
16	90	0	70	是	2.463
16	90	0	80	是	3.217
20	90	0	36	是	0.701
20	90	0	45	是	1.096
20	90	0	60	是	1.949
20	90	0	70	是	2.652
20	90	0	80	是	3.461

2) 第 2 组数值模拟 16 mm 喷嘴直径 3 种流速、5 种不同靶距下的出口压力值，见表 2。

表 2 3 种射流速度下不同靶距喷嘴出口压力

喷嘴直径/mm	喷射角度/(°)	靶距/mm	射流速度/(m·s⁻¹)	是否淹没射流	到泥面压力/MPa
16	90	0	36	是	0.652
16	90	30	36	是	0.577
16	90	60	36	是	0.506
16	90	90	36	是	0.444
16	90	130	36	是	0.366
16	90	0	45	是	1.018
16	90	30	45	是	0.901
16	90	60	45	是	0.789
16	90	90	45	是	0.690
16	90	130	45	是	0.554
16	90	0	60	是	1.810
16	90	30	60	是	1.599
16	90	60	60	是	1.401
16	90	90	60	是	1.223
16	90	130	60	是	0.996

由表2可知, 当喷嘴大小和射流速度一定时, 靶距越大则泥面受到的压力越小。经过计算得到, 当喷嘴出口直径不变的情况下, 当靶距由0增大到30 mm时, 泥面受到的压力值减小11.55%; 当靶距由30 mm增大到60 mm时, 泥面受到的压力值减小12.35%; 当靶距由60 mm增大到90 mm时, 泥面受到的压力值减小12.53%; 当靶距由90 mm增大到130 mm时, 泥面受到的压力值减小18.58%; 当靶距为130 mm时, 泥面受到的压力值较靶距为0 mm时减少44.85%。

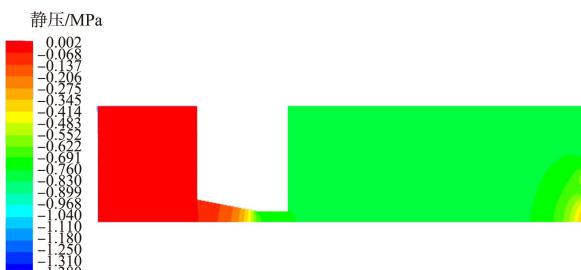
3) 第3组数值模拟工况为16 mm喷嘴直径在2种流速下、3种不同喷射角度出口压力值, 见表3。

表3 不同喷射角度下喷嘴出口压力

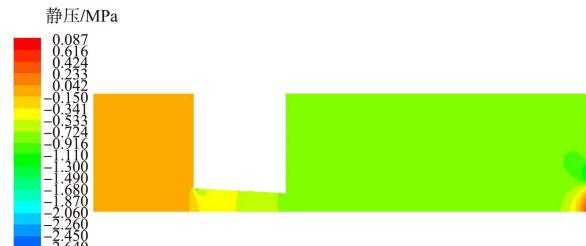
喷嘴直径/mm	喷射角度/(°)	靶距/mm	射流速度/(m·s ⁻¹)	是否淹没射流	到泥面压力/MPa
16	90	0	36	是	0.662
16	60	0	36	是	0.656
16	45	0	36	是	0.656
16	90	0	60	是	1.840
16	60	0	60	是	1.827
16	45	0	60	是	1.825

由表3可知, 喷射角度的变化对喷嘴的喷射压力影响不大, 不同喷射角度下喷嘴出口压力值相差仅10 kPa, 从压力作用于土体表面的角度来看, 喷射角度的减小影响了作用于土体内部的作用力; 但从射流是否能从土体中出来的角度来看, 90°射流冲刷的情况下不利于被破坏土体从未破坏土体中出来, 从相关研究报告^[6]来看, 60°较为合适。

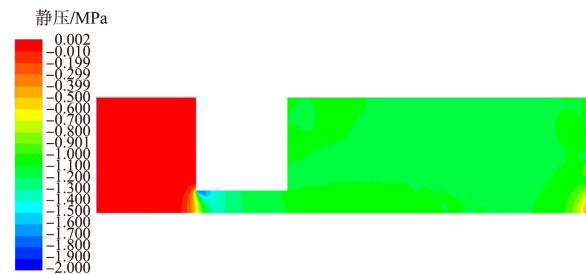
4) 第4组数值模拟工况为喷嘴射流速度36 m/s、喷射角度90°、靶距0 mm时3种不同喷嘴直径, 进行数值计算分别得到静压和动压。



a) 喷嘴直径d=10 mm

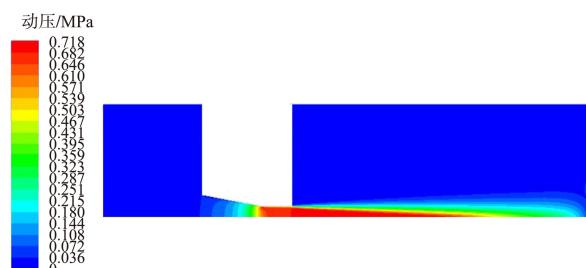


b) 喷嘴直径d=16 mm

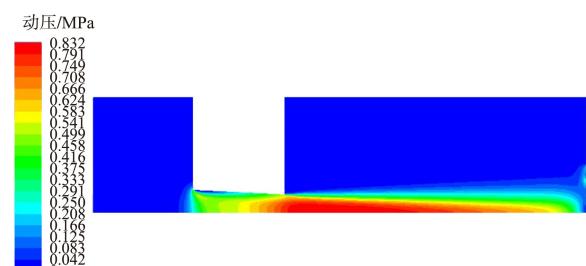


c) 喷嘴直径d=20 mm

图4为3种不同喷嘴出口直径计算得到的截面静压, 从图4可以看出水的压力经过喷嘴时迅速减小, 此时水的压力势能大部分转化为水的速度动能, 形成了一定速度的高速水流冲刷泥床。喷嘴直径d=10 mm时, 静压在缩口段呈递减趋势降低, 在喷嘴缩口段和直管段过渡处静压迅速降低; 喷嘴直径为16和20 mm时, 在缩口段和直管段内, 静压呈逐步降低趋势, 但相较于10 mm喷嘴时静压下降幅度低。



a) 喷嘴直径d=10 mm



b) 喷嘴直径d=16 mm

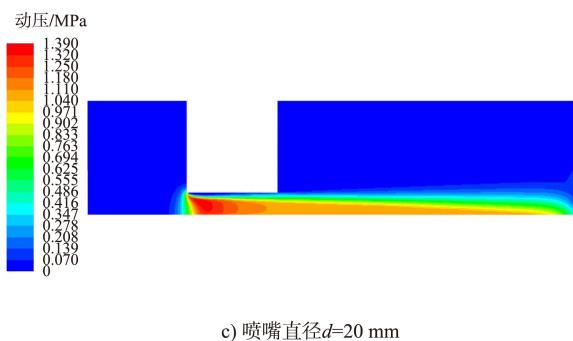


图 5 出口动压力分布

图 5 为 3 种不同喷嘴出口直径计算得到的截面动压力分布, 可以看出 3 种喷嘴直径情况下喷嘴直管段水的动压力值最高, 并可以把最大动压力值保持到喷嘴出口, 随着喷射距离的增大动压力值逐渐降低。

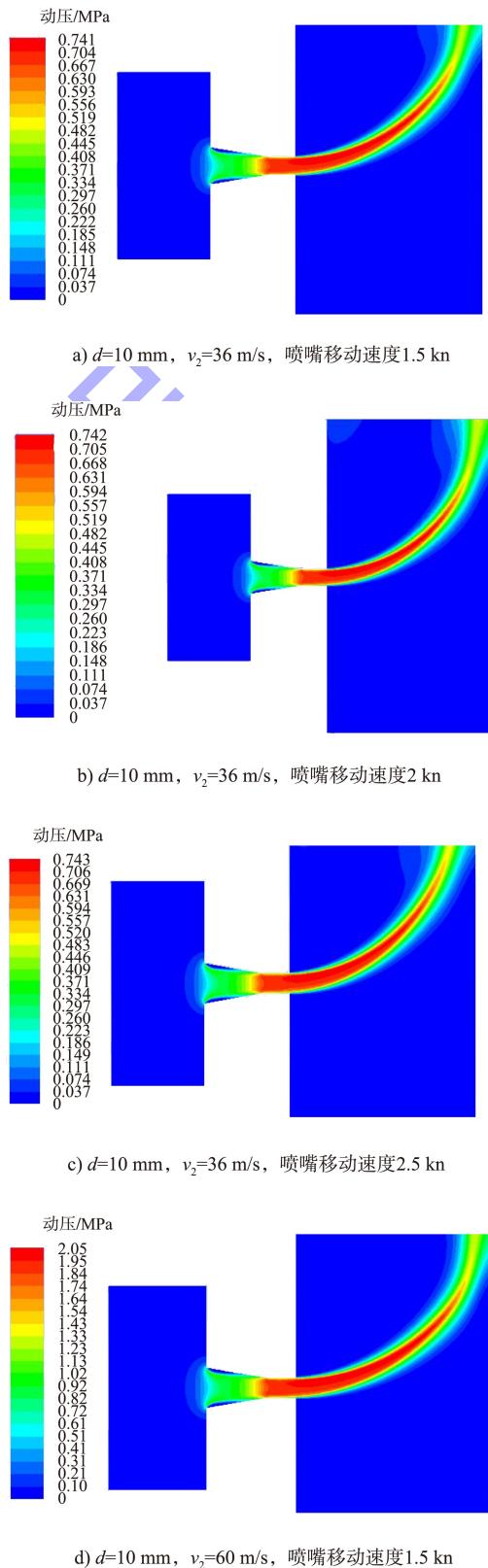
3.2 喷嘴移动情况下数值计算结果与分析

利用软件进行二维造型, 喷嘴前端水域为 $50\text{ mm} \times 50\text{ mm}$, 喷嘴直径同上节, 采用非结构网格进行单元网格划分, 网格总数量为 829 316, 网格节点数为 414 652。数值模型边界条件为速度进口, 出口条件为自由出流和壁面边界。数值模拟中, 速度与压力的耦合采用 SIMPLE 方法, 动量方程的离散采用边界上的二阶迎风格式。绝对残差收敛判定准则设置为 0.000 01, 迭代计算步数为 5 000 步。

表 4 两种喷嘴直径、不同移动速度喷嘴出口压力

喷嘴直 径/mm	喷射角 $\theta/^\circ$	靶距/ mm	射流速度/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	是否淹 没射流	移动 速度/kn	到泥面 压力/MPa
10	90	0	36	是	1.5	0.653
10	90	0	36	是	2.0	0.653
10	90	0	36	是	2.5	0.653
10	90	0	60	是	1.5	1.814
10	90	0	60	是	2.0	1.814
10	90	0	60	是	2.5	1.814
16	90	0	36	是	1.5	0.665
16	90	0	36	是	2.0	0.665
16	90	0	36	是	2.5	0.665
16	90	0	60	是	1.5	1.847
16	90	0	60	是	2.0	1.847
16	90	0	60	是	2.5	1.848

两种喷嘴直径、3 种喷嘴移动速度下出口压力值见表 4, 当射流速度不变、喷嘴移动速度为 1.5、2、2.5 kn 的 3 种情况下, 泥面受到压力变化不大。



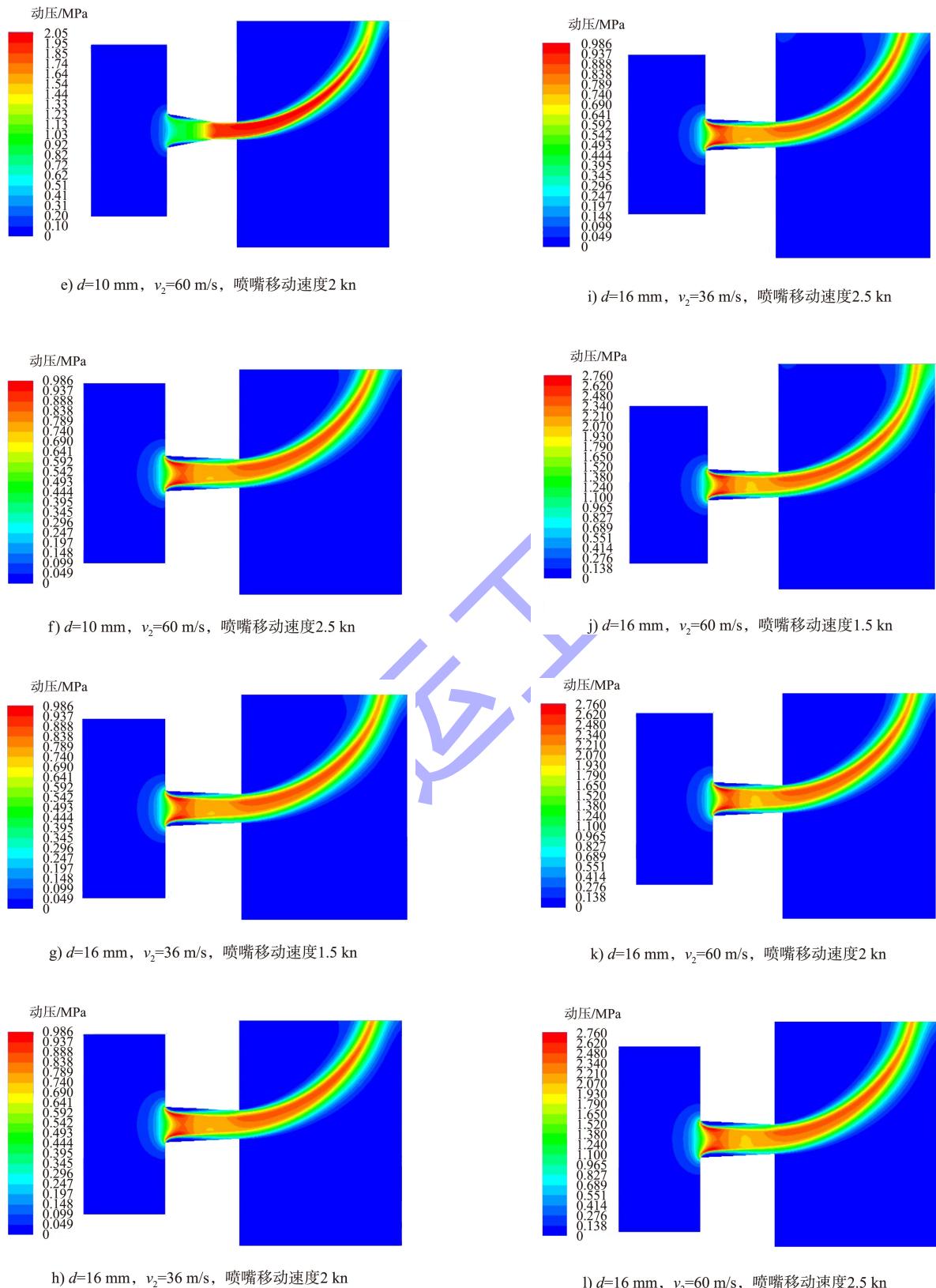


图6 喷嘴移动情况下不同直径喷嘴出口压力分布

由图 6 可知,由于喷嘴的移动,导致高压喷嘴射流方向向喷嘴移动反方向偏移。随着靶距的增加,泥面受到的水的动压值逐渐减小。出口管径 $d=10\text{ mm}$ 时,喷嘴内的能量损失较少,对泥面的冲击力较大;出口管径 $d=16\text{ mm}$ 时,水在喷嘴内流动时的动压损失较大。

4 结论

1) 喷嘴进口速度及其他参数相同的情况下,由于喷嘴处局部阻力的影响,喷嘴直径越大,泥面承受的射流压力略微增加。

2) 喷嘴射流压力对靶距的敏感性较高,靶距增加至喷嘴直径的 8 倍时,射流压力下降近一半。

3) 在喷嘴进口尺寸相同的情况下,随着喷嘴直径增大,喷嘴内部出现低压区,影响射流的能量传递。

4) 射流喷射角度仅从射流压力来看,90°为最佳角度;但从破土量角度来看,60°喷射角度较好,利于被破坏土体的移动。

5) 喷嘴射流压力随射流速度增加而增加,对喷嘴移动速度的敏感性较低。破土与否主要与射

流的作用时间和射流压力有关,得到射流压力后可将其与相关软件进行耦合计算,分析在不同时间步下压力射流破坏土体的实际作用效果。

参考文献:

- [1] 田忠.高速淹没射流冲击压强的试验和数值模拟研究[D].成都:四川大学,2003: 40-62.
- [2] 林风,洪国军.自航耙吸挖泥船耙头垂直高压冲水系统的数值模拟[C]//机械疏浚专业委员会第二十次疏浚与吹填技术经验交流会论文与技术经验总结文集.北京:中国水力发电工程学会机械疏浚专业委员会,2007(11): 105-112.
- [3] 树伟,江帅.自航耙吸挖泥船耙头高压冲水系统模型研究[C]//中国交通建设集团有限公司第一届科技大会论文集.北京:中国交通建设集团有限公司,2009: 170-174.
- [4] 沈伟平,孙雪梦,赵学,等.耙头高压冲水改进技术[J].水运工程,2012(3): 159-162.
- [5] 康学增,江帅,尹纪富.耙吸挖泥船超高压淹没水射流特性研究[J].中国港湾建设,2017,37(5): 1-5, 14.
- [6] 陈建,郭立稳,武建国等.高压水射流枪头口径及冲孔角度试验研究[J].煤矿安全,2016,47(5): 1-5.

(本文编辑 武亚庆)

(上接第 185 页)

- [4] 李军世,孙钧.上海淤泥质粘土的 Mesri 蠕变模型[J].土木工程学报,2001,34(6): 74-79.
- [5] 朱登峰,黄宏伟,殷建华.饱和软粘土的循环蠕变特性[J].岩土工程学报,2005,27(9): 1060-1064.
- [6] WANG Y Z, WANG T T, XIAO Z, et al. A nonlinear rheological model of soft clay and its application in settlement of sunk ship[J]. China ocean engineering, 2008, 22(3): 465-476.
- [7] 赖华辉.淤泥质粘土的流变特性及其应用研究[D].上海:上海交通大学,2013.
- [8] 李硕,王常明,吴谦,等.上海淤泥质黏土固结蠕变过程中结合水与微结构的变化[J].岩土力学,2017,38(10): 2809-2816.
- [9] 水利部水利水电规划设计总院,南京水利科学研究院.

土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S].北京:中国计划出版社,2019.

- [10] 高映菲.淤泥质土的流变特性及其工程应用研究[D].南京:南京航空航天大学,2018.
- [11] 张春阳,曹平,汪亦显,等.自然与饱水状态下深部斜长角闪岩蠕变特性[J].中南大学学报(自然科学版),2013,44(4): 1587-1595.
- [12] 黄海峰,巨能攀,周新,等.红层滑坡滑带土经验型蠕变模型研究[J].人民长江,2017,48(5): 91-95.
- [13] 邹良超,王世梅.古树包滑坡滑带土蠕变经验模型[J].工程地质学报,2011,19(1): 59-64.

(本文编辑 王璁)