

doi:10.3969/j.issn.1003-2029.2021.06.011

基于 Fluent 的高压水射流喷枪仿真及优化

李 勇¹, 高 辉^{1,2*}, 刘飞飞¹

(1. 北京石油化工学院机械工程学院, 北京 102600;

2. 深水油气管线关键技术与装备北京市重点实验室, 北京 102600)

摘 要: 通过研究高压水射流喷枪中各个参数对清除效果的影响规律, 选择合理的喷枪参数, 设计加工出清除效果较为合理的高压水射流喷枪, 从而使附着于海底管道上海洋生物的清理更加高效便捷。结合 GAMBIT 建模理论, 建立不同参数下喷枪的简化模型, 利用该模型, 通过 FLUENT 仿真模拟了不同参数的喷枪其喷嘴出口处水射流的动压和速度的变化规律。在此基础上, 结合液体动力学中的相关知识, 对高压水射流喷枪的清除效果进行预测并分析各个参数的敏感性。研究表明: 入口压力、喷嘴倾角、喷嘴个数以及喷嘴孔径对喷枪的清除效果有着不同程度的影响。且在目前的泵站基础下, 经过仿真分析可知, 在入口压力 (即泵站压力) 为 70 MPa 的环境下, 当喷嘴倾角为 30° 时, 喷嘴出口直径取值范围为 1.6~1.8 mm 的双喷嘴喷枪, 会达到一个较为理想的清除效果。

关键词: 高压水射流喷枪; 清除效果; 入口压力; 喷嘴倾角; 喷嘴孔径

中图分类号: P756 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-2029 (2021) 06-0080-09

海洋平台是海上油气资源开采工程中非常重要的基础设施, 是众多开采设备的载体, 在现代海洋开发中扮演着重要的角色^[1-3]。随着海洋平台使用年限的增加, 大量的海洋生物会附着在导管架的钢结构上, 附着的海洋生物一方面使得海洋平台导管架的自重增加, 导致其承载能力下降, 另一方面加快了导管架在海洋环境中的腐蚀速度, 也降低了导管壁的光滑程度, 使桩腿所受的洋流冲击力增加, 严重威胁着海洋平台的安全生产, 并且极大地缩短了海洋平台的使用寿命, 因此, 对导管架附着硬质海洋生物进行清理, 对于保障平台安全具有重要意义^[4-5]。目前, 国内尚无其他公司研究导管架海洋生物清理的自动化设备。而利用传统的清理技术, 不能充分满足导管架附着海洋生物的清理要求, 而且其清理效率低下, 作业危险性高, 清理成本较大,

从一定程度上制约了我国海上油气资源的开采^[6-7]。近年来, 高压水射流技术逐渐受到人们的关注, 由于其具有清理速度快、成本低、清净率高、不污染环境等优点而被广泛应用于各种设备的清洗, 因此研制高效、自动化的高压水射流专用清理设备会极大地促进我国海洋事业的发展。

1 模型的建立

1.1 喷枪结构

高压水射流喷枪的整体结构图如图 1 所示。喷枪主体由两个子机构组成, 分别是清理机构和二级传动机构。

清理机构主要由上端盖、喷枪杆、喷枪旋转头和喷嘴组成。首先高压水发生装置产生高压水, 水

收稿日期: 2021-04-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (U1906217)

作者简介: 李勇 (1995—), 男, 硕士研究生, 主要从事机电技术研究。E-mail: 2020540207@bupt.edu.cn

通讯作者: 高辉 (1981—), 男, 博士, 副教授, 主要从事水下维修技术及装备研究。E-mail: gaohui@bupt.edu.cn

流通过软管与上端盖, 经过喷枪杆内孔到达喷枪旋转头后分流给各个喷嘴, 最后喷嘴产生高压水射流。其中上端盖与喷枪杆间隙配合 (中间配有旋转轴密封圈), 喷枪旋转头可以根据不同工况来选取不同角度及通路数目, 使清理效率最大化。

二级传动机构主要由液压马达、箱体和二级齿轮减速器 3 部分组成。本系统采用液压驱动, 液压马达安装在箱体密封盖的左侧, 通过二级齿轮传动系统把扩大后的转矩传递给喷枪杆。箱体主要由齿轮箱和密封盖组成, 其内部主要作用是安放二级齿轮减速器和喷枪杆, 为使整个清理机构简洁, 紧凑, 易携带, 箱体设计为直槽口形状, 此种形状的箱体最节省空间。二级齿轮减速器主要由马达齿轮、传动轴齿轮、传动轴和喷枪齿轮组成。本传动机构由于是齿轮传动, 传动比稳定, 基本不受外界环境的影响, 并且还可以通过调节液压马达的流量来控制喷枪杆的旋转速度, 根据不同的工况调节出一个合适的旋转速度, 达到较好清理效果和较高的清理效率。

1.2 GAMBIT 有限元计算模型

高压水从图 1 所示的高压水管接入口进入喷枪

以后, 其流动状态只受喷枪内部结构的影响^[8-9], 所以在建立 GAMBIT 模型时, 只需将喷枪的内部结构表示出来即可。由于喷枪是在水下工作的, 所以为了研究水射流离开喷嘴后的流动状态, 在建模时还需将与喷嘴出口相连的部分海水区域表示出来。利用 FLUENT 进行仿真计算时, 网格的数目和质量对于计算结果很重要^[10], 因此需要将喷枪的内部结构做一定的简化处理, 最后得到的 GAMBIT 模型如图 2 所示。此为不同喷嘴数的模型, 在研究其他参数时, 在该模型中对所要研究的参数进行修改即可。

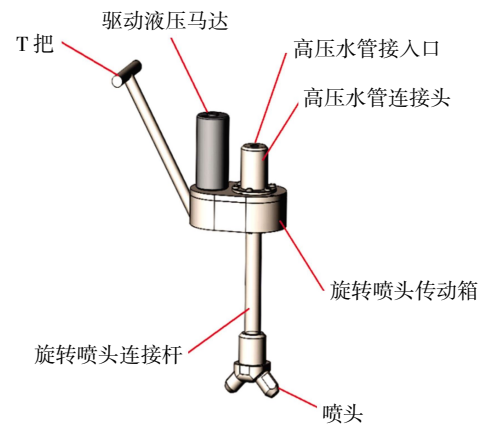
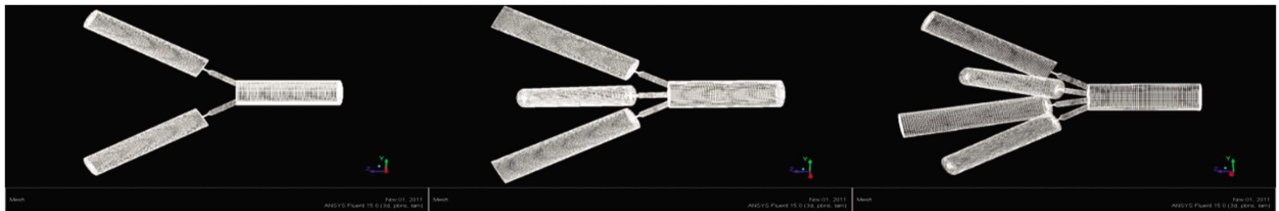


图 1 喷枪整体结构图



(a) 2 喷嘴

(b) 3 喷嘴

(c) 4 喷嘴

图 2 不同喷嘴数的 GAMBIT 模型

1.3 基本控制方程

结合高压水射流的流动特点, 查阅相关文献, 可知喷枪内高压水的流动属于粘性不可压缩、非定常湍流流动, 所以采用在柱坐标下的标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型建立控制方程组^[11-12]。另外还需联立连续方程和 Navier-Stokes (N-S) 方程来计算求解喷枪内高压水流动的各个运动状态, 计算方法见公式 (1)。

$$\frac{1}{r} \left[\frac{\partial}{\partial x} (r\rho u\phi) + \frac{\partial}{\partial r} (r\rho v\phi) \right] = \frac{1}{r} \left[\frac{\partial}{\partial x} (r\Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial r} (r\Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial r}) \right] + S_{\phi} \quad (1)$$

(1) 在连续性方程中, $\phi = l$; $\Gamma_{\phi} = 0$; $S_{\phi} = 0$ 。

(2) 在力方向上的动量方程中,

$$\begin{aligned} \phi &= u; \\ \Gamma_{\phi} &= \mu + \mu_r; \\ S_{\phi} &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[(\mu + \mu_r) \frac{\partial u}{\partial x} \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[(\mu + \mu_r) \frac{\partial u}{\partial r} \right]. \end{aligned}$$

(3) 在 r 方向上的动量方程中,

$$\begin{aligned} \phi &= v; \\ \Gamma_{\phi} &= \mu + \mu_r; \\ S_{\phi} &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[(\mu + \mu_r) \frac{\partial u}{\partial x} \right] + \end{aligned}$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[(\mu + \mu_r) \frac{\partial u}{\partial x} \right] - 2(\mu + \mu_r) \frac{v}{r^2}。$$

(4) 在紊动量方程中,

$$\phi = k; \Gamma_\phi = \mu + \frac{\mu_r}{\sigma_k}; S_\phi = G - \rho \varepsilon。$$

(5) 在耗散率方程中,

$$\phi = \varepsilon; \Gamma_\phi = \mu + \frac{\mu_r}{\sigma_\varepsilon}; S_\phi = \frac{C_1 \varepsilon}{k} G - G_2 \frac{\rho \varepsilon^2}{k}。$$

上述中: $G = (\mu + \mu_r) \times 2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{v}{r} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2$; G 为湍动能产生项; μ 为动力粘性系数; μ_r 为紊流粘性系数, $\mu_r = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}$; σ_k 为 k 的紊流 Prandtl 数, $\sigma_k = 1.0$; σ_ε 为 ε 的紊流 Prandtl 数, $\sigma_\varepsilon = 1.3$; 各常数的取值为 $C_\mu = 0.09$; $C_1 = 1.505$; $C_2 = 1.92$ 。

2 参数对淹没射流效果的影响

喷枪的清除效果, 取决于单位质量高压水所蕴含的总能量的大小。由液体的伯努利方程可知, 对于流动的液体来说。其总能量包括压力能、动能和势能, 由于高压水射流具有很高的压力和很大的速度, 所以其势能对于水射流总能量的影响可以忽略, 因此只需要对不同参数下的喷嘴出口处动压和速度做相应的比较^[13-14]。

由于不同类型的喷枪参数对喷嘴出口处动压和速度有着不同程度的影响, 因而有必要对不同参数下的喷枪进行研究^[15-16]。影响喷枪清除效果的参数

主要有: 入口压力、喷嘴倾角、喷嘴个数以及喷嘴孔径, 不同类型的参数对喷枪清除效果的影响程度以及规律不同^[17-19], 本文采用控制变量法, 对影响喷枪清除效果各类参数逐个进行仿真分析, 最后选择出各类参数的最佳组合, 使喷枪达到一个更好的清除效果。

2.1 喷嘴倾角

高压水从旋转喷头连接杆进入喷嘴的过程中, 由于喷嘴具有一定的倾角, 会对高压水的动能和压力能造成不同程度的衰减, 所以高压水射流喷枪的喷嘴倾角是影响其清除效果的一个重要因素。本节分别对喷嘴倾角为 30°、45°和 60°的双喷嘴喷枪进行模拟仿真, 除喷嘴倾角外, 其他参数均保持一致。利用 GAMBIT 建立二维轴对称模型, 并做前处理 (网格划分)。将不同倾角的 GAMBIT 模型分别导入 FLUENT 中, 设置相同的边界条件进行数值计算^[20]。此处入口压力设置为 90 MPa, 假设该喷枪在 100 m 水下工作, 出口压力设置为 1 MPa。最终得到如图 3 和图 4 所示的动压云图和速度云图, 动压曲线和速度曲线如图 5 所示。

由图 3 至图 5 可知, 随着喷嘴倾角的增大, 喷枪在水平方向的有效喷射距离在减小。综合考虑动压和速度在整个喷嘴内外的分布以及变化, 并且结合喷枪在加工制造以及工作时的实际工况, 可以得出如下结论, 在其他条件都相同的情况下, 喷嘴倾角为 30°时, 高压水离开喷嘴时的动压最大, 速度最高, 喷嘴管径较大部分的压力差和速度差最小,

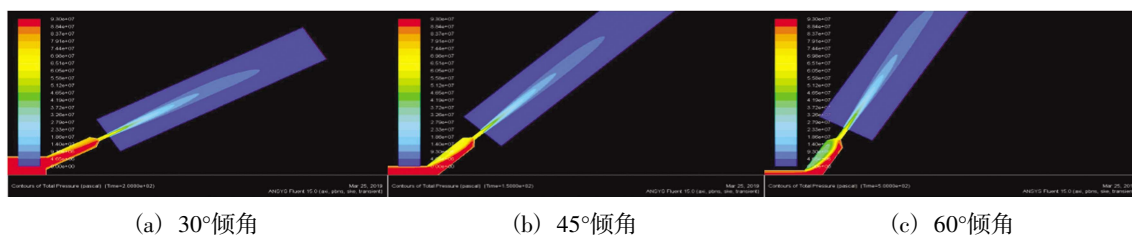


图 3 不同喷嘴倾角下的动压云图

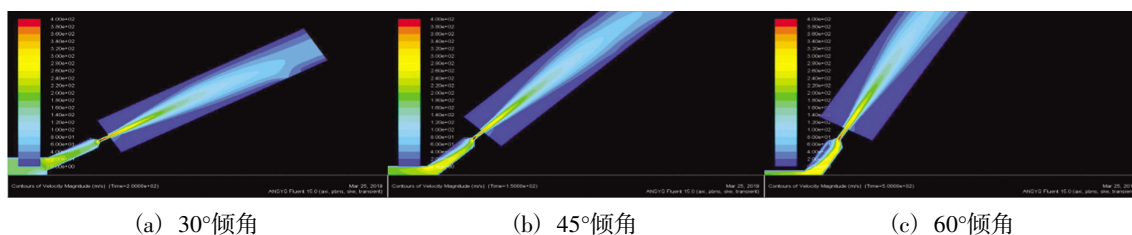


图 4 不同喷嘴倾角下的速度云图

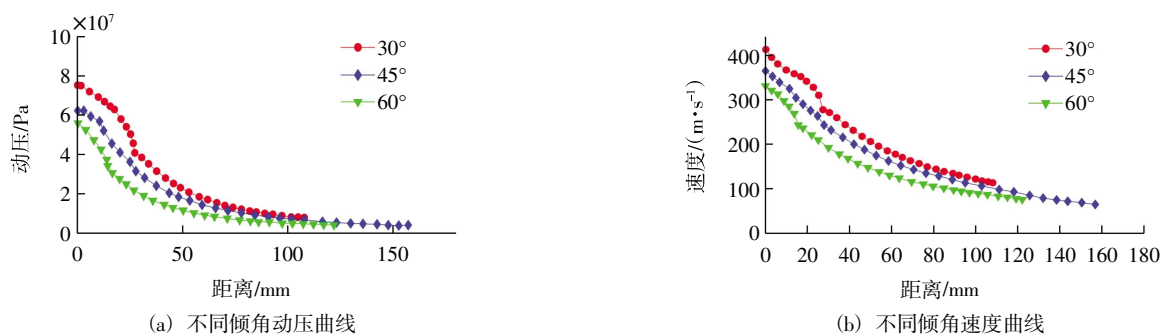


图5 不同倾角曲线

喷嘴与喷枪连接处螺纹受到的径向力最小, 对螺纹连接处的力学性能要求最低, 加工制造起来更方便一些。喷枪在水平方向的有效射程最大, 对海洋生物物的清除效果最好。唯一不足的是, 喷枪转动时扫过的面积较小, 在一定程度上降低了清除效率。

2.2 入口压力

高压水从喷枪上端的高压水管接入口进入喷枪, 经过各个阶段的能量损失之后离开喷嘴, 从高压水管接入口注入不同压力的高压水, 就会在喷嘴出口处得到具有不同动压和速度的水射流, 所以入

口压力也是影响喷枪清除效果的另一重要因素^[21]。利用 2.1 中的喷嘴倾角为 30° 的 GAMBIT 模型, 将其导入 FLUENT, 入口边界条件设置为压力入口, 出口边界条件设置为压力出口, 出口压力仍然设置为 1 MPa。分别对入口压力为 50 MPa、70 MPa 和 90 MPa 的情况进行计算, 最终得到如图 6 和图 7 所示的动压云图和速度云图, 动压曲线和速度曲线如图 8 所示。

由图 6 至图 8 可以看出, 在其他条件都相同的情况下, 给定的 3 种入口压力中, 当入口压力设置

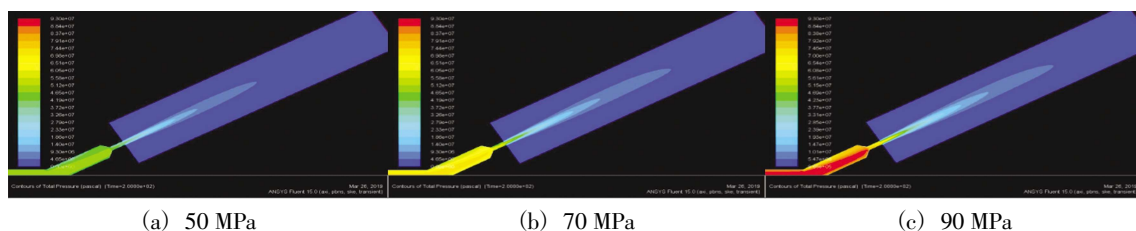


图6 不同入口压力下的动压云图

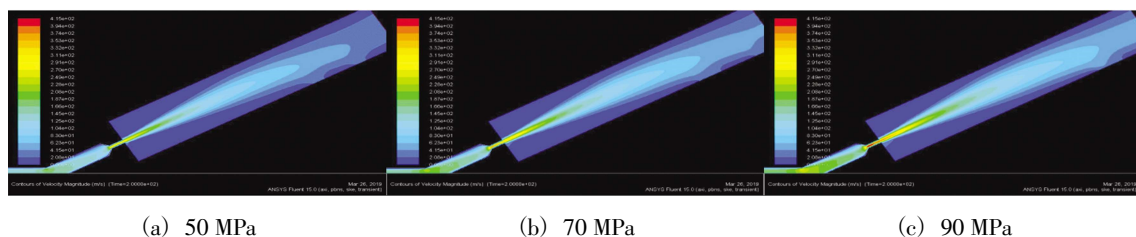


图7 不同入口压力下的速度云图

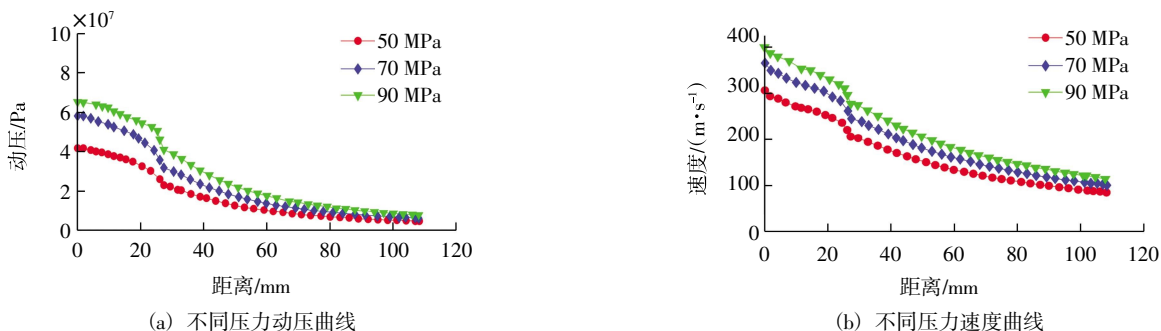


图8 不同压力曲线

为 50 MPa 时, 高压水离开喷嘴时的动压和速度都是最小的, 而且离开喷嘴后的有效射程也是最短的, 所以入口压力为 50 MPa 时, 喷枪对海洋生物的清除效果是最差的。当入口压力由 50 MPa 上升至 70 MPa 时, 高压水离开喷嘴时的动压和速度都会有大幅度的提高, 离开喷嘴后的有效射程也会有显著的增加, 相应的喷枪对海洋生物的清除效果也会好很多。

当入口压力由 70 MPa 上升至 90 MPa 时, 高压水离开喷嘴时的动压和速度都只有微小的提高, 离开喷嘴后的有效射程也增加的不是很明显, 由前面的推断可知, 其对应喷枪的清除效果也和入口压力为 70 MPa 时相差不大。但是当入口压力上升为 90 MPa 时, 对液压泵以及整个喷枪的力学性能都会有更高的要求。所以在喷枪实际工作时, 入口压力选用 70 MPa 更加经济实用。

2.3 喷嘴数量

喷枪上每个喷嘴对其内部的高压水都会有一定的分流分压作用, 所以喷嘴的个数会影响喷嘴出口

处水射流的动压和速度, 从而影响到喷枪对海洋生物的清除效果^[22]。分别对喷嘴数为 2、3、4 的喷枪进行分析比较, 此处除了喷嘴个数外, 其他参数均保持一致。为了方便观察和比较, 得到更加可靠的结论, 统一建立三维模型。由前面的分析可知, 喷嘴倾角为 30° 且入口压力选用 70 MPa 时清除效果最好, 所以分别建立带有两个喷嘴、3 个喷嘴和 4 个喷嘴且倾角均为 30° 的三维喷枪模型, 入口压力均按 70 MPa 计算。假设该喷枪在 100 m 水深的工况下工作, 出口压力按 1 MPa 计算。利用 GAMBIT 建立模型, 并做前处理 (网格划分), 将不同喷嘴数的 GAMBIT 模型分别导入 FLUENT 中, 设置相同的边界条件, 进行数值计算后得到如图 9、10 所示的动压云图和速度云图, 动压曲线和速度曲线如图 11 所示。

通过比较图 11(a) 可以发现, 在其他条件都相同的情况下, 喷嘴数为 4 时, 高压水离开喷嘴时的动压最小, 经衰减之后的有效喷射距离也最近。喷嘴数为 3 时, 高压水离开喷嘴时的动压以及经衰减

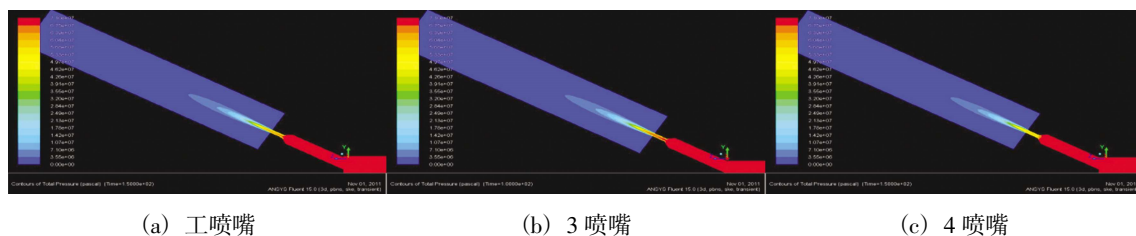


图 9 不同喷嘴数下的动压云图

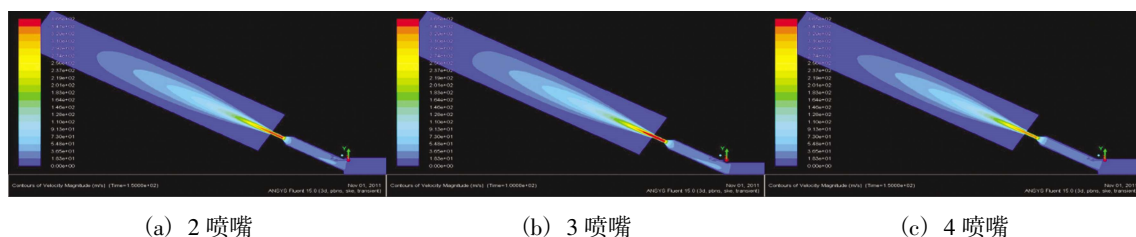


图 10 不同喷嘴数下的速度云图

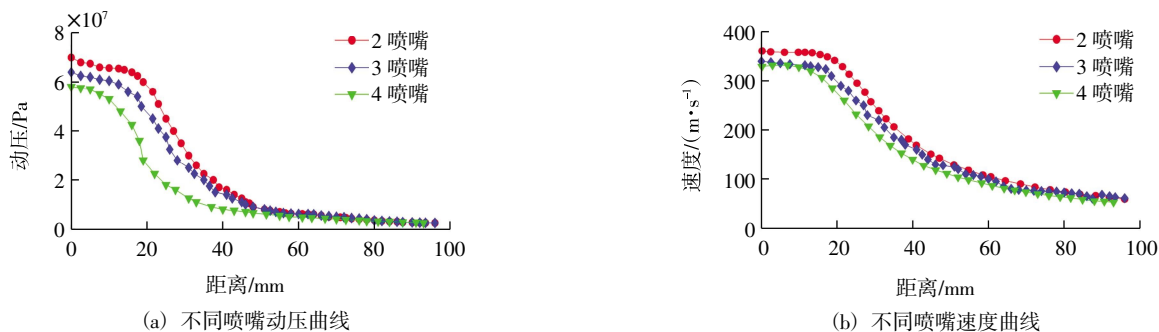


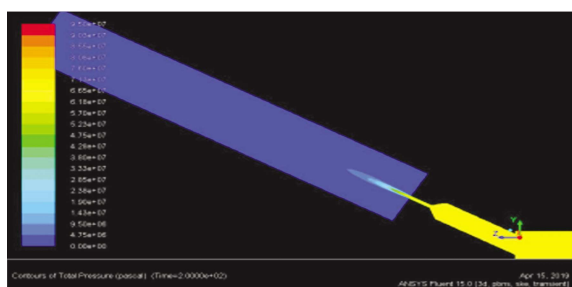
图 11 不同喷嘴曲线

之后的有效喷射距离都有所增加。喷嘴数为2时的动压云图和喷嘴数为3时非常类似, 高压水离开喷嘴时的动压以及经衰减之后的有效喷射距离都相差甚小。通过观察图 11(b)可以发现, 速度云图和动压云图具有一致的结论。综上所述, 当喷嘴数为2或者3时, 喷枪的清除能力最强, 清除效果最好。但是目前配备的液压泵站的最大流量为 90 L/min, 而根据流量计算公式, 此处喷嘴直径为 3 mm, 从速度云图中可以大致估算出 2 喷嘴时的出口平均速度为 175 m/s, 由此计算出来的单个喷嘴所需流量为 74.18 L/min, 此时的泵站流量只能满足一个喷嘴, 为了使两个喷嘴能够同时正常工作, 只能通过缩小喷嘴出口孔径来节省流量。

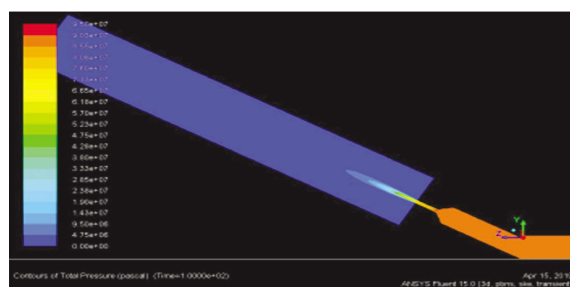
2.4 喷嘴出口直径

根据经验可知, 在喷嘴出口动压和速度一定的

前提下, 喷嘴的出口直径越小, 其水射流离开喷嘴后的动压和速度衰减的就越快, 喷枪的有效喷射距离就越近^[23], 所以在满足流量需求的情况下, 喷嘴的出口直径不宜太小。王丽萍等^[24]在 2017 年发现在类似的设备中, 1.6 mm 孔径比较常用, 所以试选用喷嘴直径为 1.6 mm 的喷枪进行仿真分析。建立两喷嘴、喷嘴倾角 30°、喷嘴出口直径为 1.6 mm 的喷枪模型, 将其导入 FIUENT 中, 分别将入口边界条件设置为压力入口和流量入口, 压力入口中入口压力设置为泵站所能提供的最大压力, 即 70 MPa, 流量入口中入口流量设置为泵站所能提供的最大流量, 即 90 L/min, 其他条件和前面的章节保持一致。进行数值计算后得到如图 12 和图 13 所示的动压云图和速度云图, 动压曲线和速度曲线如图 14 所示。

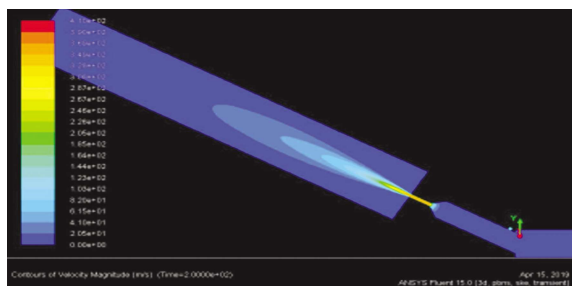


(a) 70 MPa

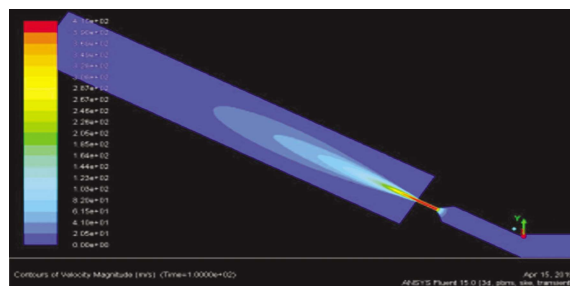


(b) 90 L/min

图 12 1.6 mm 时的动压云图

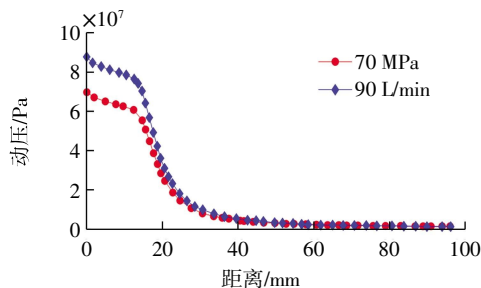


(a) 70 MPa

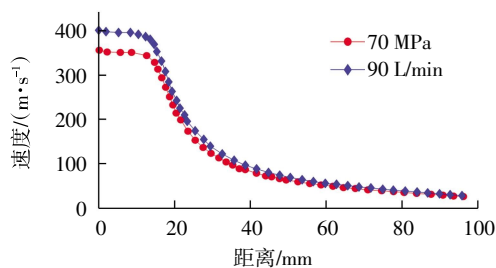


(b) 90 L/min

图 13 1.6 mm 时的速度云图



(a) 1.6 mm 时的动压曲线

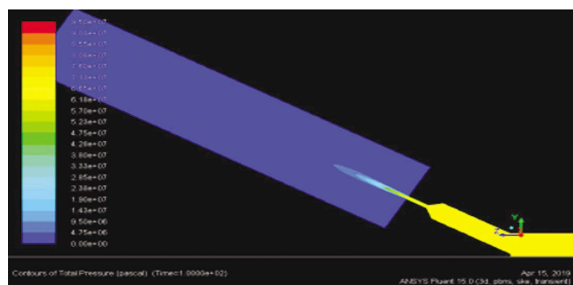


(b) 1.6 mm 时的速度曲线

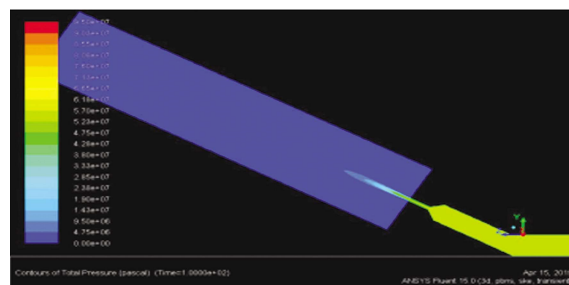
图 14 1.6 mm 时的曲线

将不同入口边界条件下得到的动压云图和速度云图分别进行对比。由图可知,入口流量为 90 L/min 时,喷嘴出口处的最大动压约为 88 MPa,最大速度约为 400 m/s;入口压力为 70 MPa 时,喷嘴出口处的最大动压约为 69 MPa,最大速度约为 355 m/s。由此可以发现,按入口流量为 90 L/min 的流量入口边界条件计算出的喷嘴出口最大动压和最大速度均比按入口压力为 70 MPa 的压力入口边界条件计

算出的值略大,这说明喷嘴数为 2、出口直径为 1.6 mm 时,清理系统所需流量小于 90 L/min。即泵站流量有所富余(也可根据流量计算公式计算喷嘴出口处的流量,可以得到相同的结论)。于是将喷嘴直径增加到 1.8 mm,其他参数与喷嘴直径为 1.6 mm 时保持一致,再次进行数值计算后得到如图 15 和图 16 所示的动压云图和速度云图,动压曲线和速度曲线如图 17 所示。

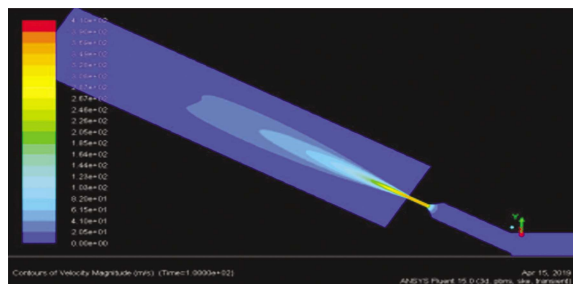


(a) 70 MPa

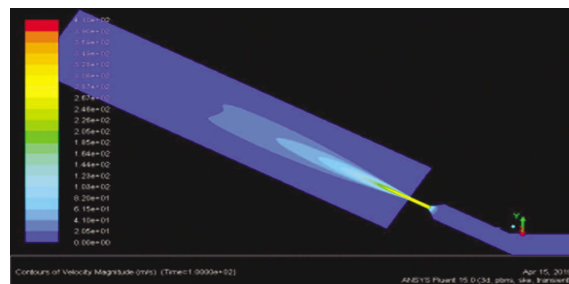


(b) 90 L/min

图 15 1.8 mm 时的动压云图

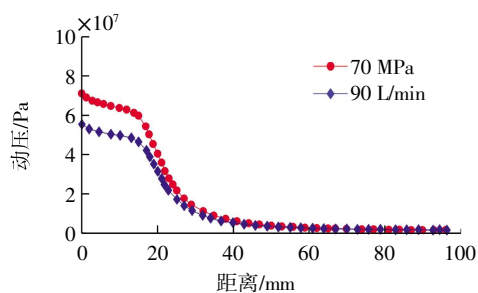


(a) 70 MPa

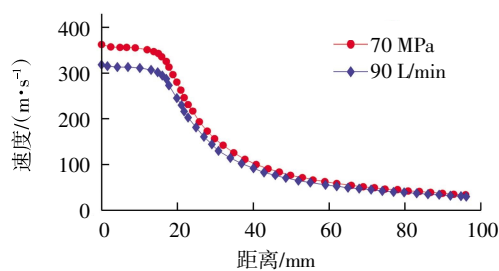


(b) 90 L/min

图 16 1.8 mm 时的速度云图



(a) 1.8 mm 时的动压曲线



(b) 1.8 mm 时的速度曲线

图 17 1.8 mm 时的曲线

由图 17 可以看出,入口流量为 90 L/min 时,喷嘴出口处的最大动压约为 57 MPa,最大速度约为 320 m/s;入口压力为 70 MPa 时,喷嘴出口处的最大动压约为 70 MPa,最大速度约为 365 m/s。由此可知,按入口流量为 90 L/min 的流量入口边界条件计算出的喷嘴出口最大动压和最大速度均比按入口压力为 70 MPa 的压力入口边界条件计算出的值小,

这说明喷嘴数为 2、出口直径为 1.8 mm 时,喷枪所需流量大于 90 L/min。即泵站流量不足(也可根据流量计算公式计算喷嘴出口处的流量,可以得到相同的结论)。

综上所述,当喷嘴出口直径取 1.6 mm 和 1.8 mm 之间的某一值时,喷枪两个喷嘴所需流量正好等于泵站所能提供的最大流量 90 L/min,此时喷枪的清

清除效果最好。但是从前面的仿真云图可以看出, 喷嘴出口直径取 1.6 mm 和 1.8 mm 时, 虽然高压水离开喷嘴时的最大动压和最大速度均有较大的差别, 但是由于高压水射流粗细的不同, 所具有的总能量不同, 所以在海水淹没环境下的衰减速度也不同。喷嘴出口直径为 1.6 mm 时, 虽然初始动压和初始速度大, 但是水流较细, 衰减速度较快; 喷嘴出口直径为 1.8 mm 时, 虽然初始动压和初始速度小, 但是水流较粗, 衰减速度较慢。所以两种不同出口直径的喷嘴, 最终的有效射程并无太大差别。考虑到喷嘴实际加工时的各种条件限制, 喷嘴直径只需在 1.6~1.8 mm 之间即可, 在此范围之内时, 喷枪的

清除效果都相差不大, 且能达到一个相对较好的清除效果。

3 网格无关性验证

网格的质量与数量关乎计算结果的精确性, 进而影响参数的可靠性, 因此需要对其进行网格无关性的验证。基于前文的分析, 针对喷嘴直径为 1.6 mm 且倾角 30° 的双喷嘴, 在入口压力为 70 MPa 的环境下进行不同质量与数量网格的计算验证, 在壁面粘性底层处理中采用壁面函数。具体如图 18 所示。

由图 18 可知, 引入高 (high)、中 (medium)

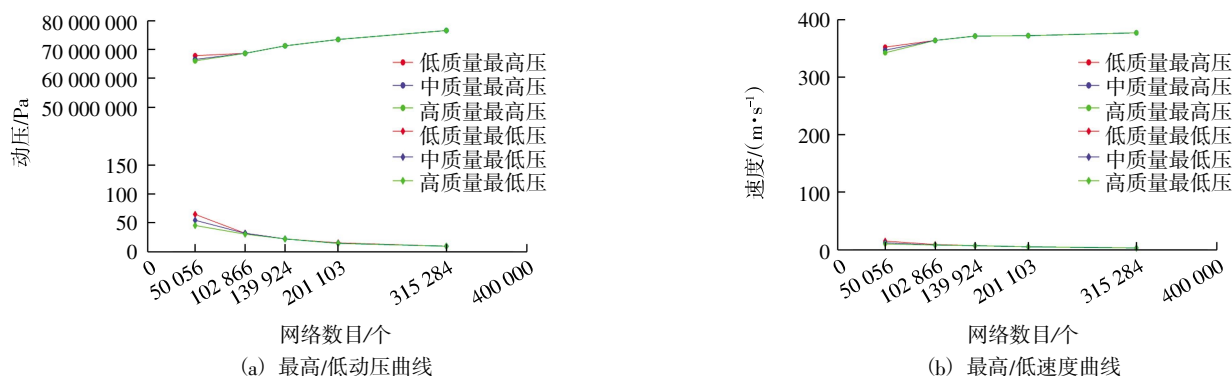


图 18 不同网格数目不同网格质量下的曲线

和低 (low) 3 种网格质量, 以及五种网格数量, 通过最高压 (max)、最低压 (min)、最高速 (max)、最低速 (min) 对比可知, 相对于网格质量, 网格数目对计算的结果影响更大, 通过与前文比较分析可知, 对于得出喷嘴直径为 1.6~1.8 mm 且倾角 30° 的双喷嘴优化参数, 以及入口压力为 70 MPa 的工作参数是合理的。

4 结 论

本文通过对各种参数的分析与比较, 对比不同

参数下水射流喷枪对附着在海底管道上的海洋生物的清除效果, 并综合考虑喷枪实际加工以及工作时的各种工况, 最终确定的喷枪参数如下: (1) 喷嘴倾角取 30°; (2) 入口压力 (即泵站压力) 取 70 MPa; (3) 喷嘴数取 2; (4) 喷嘴出口直径取值范围为 1.6~1.8 mm。在目前的泵站设备条件下, 按此组参数设计加工出来的喷枪, 会达到一个较为理想的清除效果, 如果将来配备了流量更大的液压泵站, 可通过增加喷嘴出口直径和喷嘴数来改善清除效果以提高清除效率。研究中缺少数值计算结果与试验的对比分析, 将在后续的工作中进一步研究。

参考文献:

- [1] 张其军, 吴功果, 罗文伟, 等. 附着生物控制装置在南海海上平台的应用研究[J]. 广东化工, 2021, 48(6): 122-123.
- [2] VALBUENA G. Challenges of deepwater development[J]. Offshore, 2010(7): 73-74.
- [3] 刘华祥, 袁玉杰, 曾靖波, 等. 导管架平台用钢现状及展望[J]. 中国海上油气, 2020, 32(4): 164-170.
- [4] 张勇, 韩帅帅, 曲兴刚, 等. 近海设施双壳类污损特点及应对措施概述[J]. 生态科学, 2016, 35(6): 199-203.
- [5] 刘孔忠, 官耀华, 仲华. 平湖油气田平台导管架防海洋生物装置的应用[J]. 中国海上油气 (工程), 2003(1): 50-52, 38-62.

- [6] 郭剑, 朱晓旭, 莫达勇, 等. 对海洋石油生产平台防海洋生物装置的解析[J]. 中国海上油气(工程), 2002(6): 39–44, 6.
- [7] 王怀果. 钢管桩防海洋生物装置的应用[J]. 科技创新与应用, 2015, 2: 53.
- [8] 谢成雨, 蔡毅, 云丹丹, 等. 高压水射流喷嘴设计仿真研究[J]. 煤矿机械, 2016, 37(8): 6–9.
- [9] URZMETOV O, CADET M, TEUTSCH R, et al. Investigation of the flow phenomena in high-pressure water jet nozzles[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2021, 165 (1): 320–332.
- [10] 王国志, 冉春燕, 邓斌, 等. 基于 FLUENT 远距离冲洗喷嘴的射流特性研究[J]. 液压气动与密封, 2016, 36(1): 31–34, 39.
- [11] 杨晨, 陈鑫, 薛亮, 等. Fluent 两相模型高含沙模拟需要注意的几个问题[J]. 海洋技术学报, 2020, 39(4): 36–40.
- [12] 杨国来, 周文会, 刘肥. 基于 FLUENT 的高压水射流喷嘴的流场仿真[J]. 兰州理工大学学报, 2008, 4: 49–52.
- [13] 陈赢豪, 崔宁, 邱辉武, 等. 高压水射流技术在海管维修中的应用[J]. 机械工程师, 2017(4): 139–141.
- [14] 左丰建, 杨舰波, 王晓宇, 等. 高压射流在大口径管道清洗中的应用[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2012, 32(6): 131–132.
- [15] 刘庭成, 范晓红, 刘焱. 高压水射流清洗机喷嘴的结构与参数[J]. 清洗世界, 2010, 26(9): 32–37, 41.
- [16] 韩启龙, 马洋. 喷嘴结构对高压水射流影响及结构参数优化设计[J]. 国防科技大学学报, 2016, 38(3): 68–74.
- [17] 李雷霞, 滕绍民, 宁恩成, 等. 高压水射流旋转喷头的参数分析及其应用[J]. 清洗世界, 2009, 25(5): 19–22.
- [18] 周燕辉, 肖寿仁, 郑大腾. 50 MPa 超高压数控清洗头的设计[J]. 机械设计, 2014, 31(1): 63–65.
- [19] 刘军, 吕海霆, 王琳. 高压水射流清洗设备异形喷嘴内部流场的性能研究[J]. 机械制造与自动化, 2015, 44(5): 65–67.
- [20] 王旭, 马金茹, 邓三鹏. 基于 FLUENT 的清罐机器人高压喷枪水射流场分析与研究[J]. 机器人技术与应用, 2012, 3: 30–33.
- [21] 张安琪, 刘清友, 黄本生. 锥直形喷嘴喷射角度对钻杆清洗质量的影响研究[J]. 机械设计, 2015, 32(8): 69–71.
- [22] 杨志贤, 相明明. 超高压水射流喷嘴机构的设计及试验 [J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2015, 36(5): 522–526.
- [23] 蔡毅, 苏国兵. 高压水射流喷嘴设计及有限元分析[J]. 机械设计与研究, 2017, 33(6): 163–167, 171.
- [24] 王丽萍, 蔡晓君, 窦艳涛, 等. 高压水射流清洗参数实验研究[J]. 实验室研究与探索, 2017, 36(8): 48–51.

Simulation and Optimization of High Pressure Water Jet Spray Gun Based on Fluent

LI Yong¹, GAO Hui^{1,2}, LIU Feifei¹

(1. College of Mechanical Engineering, Beijing Institute of petrochemical technology, Beijing 102600, China; 2. Beijing Key Laboratory of key technology and equipment of deep water oil and gas pipeline, Beijing 102600, China)

Abstract: By studying the influence of various parameters in the high-pressure water jet gun on the removal effect, selecting reasonable gun parameters, the high-pressure water jet gun with reasonable removal effect is designed and processed, so as to make the cleaning of organisms attached to the submarine pipeline more efficient and convenient. Combined with GAMBIT modeling theory, a simplified model of spray gun with different parameters is established. Using this model, the dynamic pressure and velocity of water jet at the nozzle outlet of spray gun with different parameters are simulated by FLUENT. On this basis, combined with the relevant knowledge of fluid dynamics, the cleaning effect of high-pressure water jet gun was predicted and the sensitivity of each parameter was analyzed. The results show that the inlet pressure, nozzle angle, nozzle number and nozzle diameter have different effects on the cleaning effect of the spray gun. Based on the current pump station, the simulation analysis shows that when the inlet pressure(i.e. pump station pressure) is 70 MPa, the nozzle inclination angle is 30°. The range of nozzle outlet diameter is 1.6–1.8 mm double nozzle spray gun can achieve an ideal cleaning effect.

Key words: high pressure water jet gun; cleaning effect; inlet pressure; nozzle inclination; nozzle aperture