排灌机械工程学报
2017 年 3 月 Mar. 2017 | 第 35 卷 第 3 期 Vol. 35 No. 3
Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering

doi:10.3969/j.issn.1674-8530.16.0006

导板式扇形喷嘴清洗射流流场的数值模拟

杨雨[1], 邱涛[2]

(1. 西南石油大学石油与天然气工程学院, 四川 成都 610500; 2. 渤海石油装备制造有限公司石油机械厂, 河北 任丘 062550)



杨雨

摘要: 为了提高导板式扇形喷嘴射流清洗效率和清洗质量,优化喷嘴结构,针对以水为单介质流体的导板式扇形喷嘴的流场特性,利用 Pro/E 软件建立了不同导流距离、导流面倾角和清洗距离的三维导板式扇形喷嘴模型. 采用标准 $k-\varepsilon$ 模型,并运用 ANSYS Workbench 软件对导板式扇形喷嘴的流场速度、压力等物理量进行了射流流场数值模拟. 在边界条件和初始条件相同的情况下,分析了导板式扇形喷嘴在不同结构参数和不同清洗距离下的射流特性变化规律,从而为导板式扇形喷嘴的设计和优化提供了一定参考依据. 结果表明:随着导板式扇形喷嘴倾斜角度 θ 的增大,打击在清洗件上的压力值逐渐减少,相反清洗范围则逐渐增大;随着清洗距离的增大,被清洗件轴线上压力逐渐减少,同时清洗范围有小幅度的增大;在 20°的扇形倾斜角度、15 和 25 mm 的导流距离及 80~120 mm 的喷头清洗距离下,导板式扇形喷嘴的清洗效果最佳. 研究结论可为扇形喷嘴的设计和优化提供参考.

关键词: 扇形喷嘴;导流面倾角;导流距离;清洗距离;射流流场;数值模拟

中图分类号: TH3; TP6 **文献标志码**: A **文章编号**: 1674-8530(2017)03-0243-05

杨雨, 邱涛. 导板式扇形喷嘴清洗射流流场的数值模拟[J]. 排灌机械工程学报,2017,35(3):243-247.

YANG Yu, QIU Tao. Numerical simulation of fan nozzle of guide board type cleaning jet flow field[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering(JDIME), 2017,35(3):243-247. (in Chinese)

Numerical simulation of fan nozzle of guide board type cleaning jet flow field

YANG Yu[1], *QIU Tao*[2]

(1. School of Petroleum Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China; 2. Petroleum Machinery Factory, Bohai Equipment Manufacturing Co. Ltd., Renqiu, Hebei 062550, China)

Abstract: In order to improve the cleaning efficiency and the cleaning quality of guide plate type fan nozzle jet, and optimize its structure, several 3D models of the fan nozzle jet at different diversion distances, diversion angles and cleaning distances are established by using Pro/E software, which is aimed at the flow field characteristics of fan nozzle jet only around water. Based on the standard $k-\varepsilon$ model, the numerical simulation of jet flow field is conducted for its flow velocity and pressure by the ANSYS Workbench software. The changing regularity of these models' jet flow characteristics under the same boundary and initial condition is analyzed, which is beneficial to the design and optimiztion the guide board type fan nozzle. The results show that with the increase of inclination θ, the blowing pressure on the cleaned piece gradually decreases; on the contrary the clean range increases. As cleaning distance increases, the pressure on the cleaned part axis gradually decreases and the clean range slightly increa-

收稿日期: 2016-01-09; **网络出版时间**: 2017-03-17
网络出版地址: http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20170317.1016.002.html
作者简介: 杨雨(1994—),女,四川南充人,硕士研究生(315812917@qq.com),主要从事油气储运安全工程研究.
邱涛(1969—),男,河南杞县人,助理工程师(通信作者,742033393@qq.com),主要从事生产安全管理研究.

ses. Thus, the cleaning effect of fan nozzle of guide board type is the best under the condition that the fan inclination is 20°, the fan striking distance is 15 mm or 20 mm and installation height of nozzle is between 80 mm and 120 mm. The conclusion can provide reference for the design and optimization of fan nozzle.

Key words: fan nozzle; diversion angle; diversion distance; cleaning distance; jet flow field; numerical simulation

喷嘴作为高压水射流发生装置的执行元件,其作用是通过喷嘴内孔横截面的收缩,将高压水的压力能聚集起来,并转化为动能,最后以高速水射流的形式向外喷出,用以对物料进行清洗、破碎或切割[1-2]. 目前,喷嘴结构主要有锥形和扇形2种,锥形结构由于水流较为集中,故清洗面积没有扇形喷嘴大. 扇形喷嘴具有清洗面积大的优点,因此已成功将其应用于混凝土打毛等作业中[3]. 扇形喷嘴的结构较独特,按照结构形式可分为导板式(窄角)扇形喷嘴和轴向扇形喷嘴,这2种扇形喷嘴虽然结构形式上差别较大,但都可以形成扇形水面[4-6]. 在相同操作条件下,导板式扇形喷嘴比轴向扇形喷嘴产生的冲击力更高,适合使用在具有强劲冲击力需求的清洗过程中,如汽车涂装前处理、钻井用油管及钻杆清洗等场合[7]. 随着高压水射流技术研究工作的不断开展,优质喷嘴的重要性已越来越明显,如何优化其结构参数,提高清洗效果,是目前高压清洗装置需要解决的问题之一[8-9]. 目前国内外研究[10-14]主要集中在锥形喷嘴上,而关于非轴对称扇形喷嘴的结构参数对内部流场的影响研究较少.

文中采用标准 $k-\varepsilon$ 模型,运用 ANSYS Workbench 软件对导板式扇形喷嘴的流场速度、压力等物理量进行射流流场数值模拟. 分析导板式扇形喷嘴在不同结构参数和不同清洗距离下的射流特性变化规律,从而为导板式扇形喷嘴的设计和优化提供一定的参考依据.

1 喷嘴结构及几何参数

导板式扇形喷嘴结构如图1所示,其结构与普通喷嘴不同的是其喷嘴出口的外部存在一个导流面. 当水流从喷孔喷出后,经导流面迅速喷出,形成具有高冲击力的窄角扇形喷雾形状,并与喷嘴轴心形成一定的转偏角度. 导板式扇形喷嘴采用独特的偏流工艺设计,大而通畅的偏流道最大限度地减少了阻塞现象,图中 l 为喷嘴出口到导流面的导流距离,θ 为导流面倾斜角度.

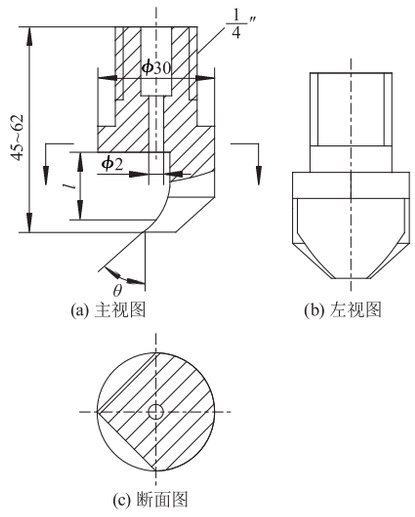


图1 扇形喷嘴结构示意图(单位:mm)
Fig. 1 Fan nozzle structure diagram

2 喷嘴有限元模型及参数设置

2.1 流域模型的创建及网格划分

利用 Pro/E 三维建模软件分别建立了不同结构参数(参数取值 $\theta=15°\sim50°$; $l=10\sim25$ mm; $h=60\sim160$ mm)下的喷嘴模型,如图2所示,图中 h 为喷嘴出口到清洗件的距离.

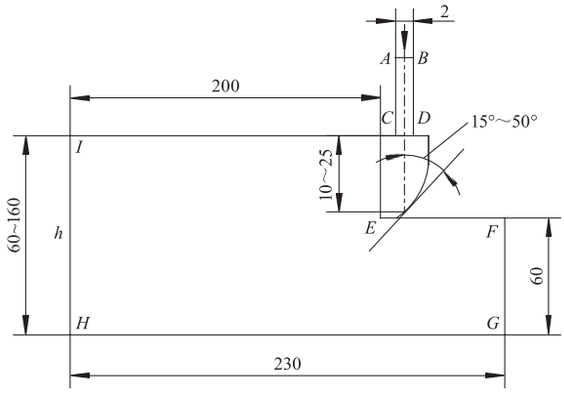


图2 流域模型二维示意图(单位:mm)
Fig. 2 2D diagram of flow field model

通过喷嘴的实体模型切割出流域部分,再通过

延伸流域边界得到不同结构参数下的喷嘴流域模型，如图 3 所示. 流域模型的网格划分采用 ANSYS Workbench 中的 Mesh 工具，设置全局网格大小为 5 mm，采用适应性较强的四面体网格，划分结果产生节点数为43 442，网格单元数为 236 085.



图 3　流域模型及网格划分
Fig. 3　Flow field model and mesh

2.2　参数设置

采用 ANSYS Workbench 软件，利用 Fluent 求解器进行设置计算，流场采用标准 $k-\varepsilon$ 模型[15-17]，设置气液两相 VOF 模型；进口设置为质量流量进口，大小为 1.6 kg/s，介质为水；出口采用压力出口，出口压力设置为 0；其余边界均默认为壁面，求解方法采用 SIMPLE 一阶求解. 为更好地收敛，迭代精度设置为 10^{-4}，迭代步数设置为 3 000 步进行计算求解.

3　计算过程及结果分析

3.1　不同导流面倾角下的流场分析

分别设置导流面倾角 θ 为 15°，20°，30°，40°，50°，喷射导流距离 l 为 10 mm，喷嘴清洗距离 h 为 100 mm，进行喷嘴射流流场的数值分析，结果如图 4 所示.

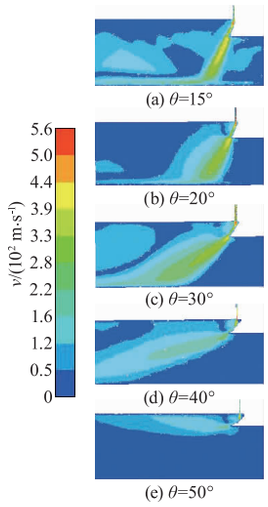


图 4　不同倾角下流场速度分布云图
Fig. 4　Flow field velocity distribution at different inclinations

从图 4 可以看出，水流从喷嘴喷口流出之后冲击导流面，水流散射，增大了清洗面积. 随着导流面倾角的增大，流速逐渐减小，同时清洗水流的方向也发生变化，以致清洗范围在减小.

图 5 为不同喷射角度下 *GH* 线上各点压力分布曲线，其中 d 为各点之间的距离，p 为压力，定义压力值达到 0.3 MPa 时具有清洗作用，压力值越大，清洗效果越佳. 从图 5 可以看出，随着导流面倾角的增大，射流在清洗件上的压力逐渐衰减，同时随着倾角增大，射流喷射距离增大，清洗范围增大；当导流面倾角为 15°时，射流打在被清洗件上的压力最大，但是能够清洗的范围较小；当倾角达到 40°，50°时，打在被清洗件上的压力相当小，清洗范围较大，射流几乎超出清洗件. 因此，综合考虑清洗范围及清洗质量，导流面倾角为 20°时，清洗效果最佳.

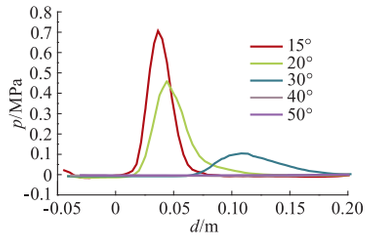


图 5　不同喷射角度下 *GH* 线上各点压力分布曲线
Fig. 5　Pressure distribution curves of each point on *GH* line at different jet angles

3.2　不同导流距离下的流场分析

创建导流面倾角为 20°，导流距离分别为 10，15，20，25 mm 的射流流域模型进行数值分析，分析中提取了 *GH* 线上的压力值，得到不同导流距离下 *GH* 线上的压力分布曲线如图 6 所示.

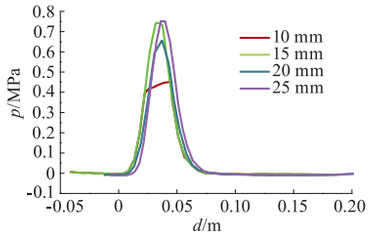


图 6　不同导流距离下被清洗件轴线上压力分布曲线
Fig. 6　Axis pressure distribution curves of cleaned part at different diversion distances

从图 6 可以看出，当导流距离为 10 mm 时，打击在被清洗件上的压力最低，而清洗范围也比较窄，该条件下清洗效果最差；当导流距离为 15 和 25 mm 时，打击压力及清洗范围都比较大，清洗效果较好，而导流距离为 20 mm 时虽然优于 10 mm，但是

清洗压力也不及15和25 mm. 因此,选择导流距离为15或25 mm时最佳.

3.3 不同清洗距离下的流场分析

选取最佳的导流面倾角20°和最佳的导流距离15,25 mm,再建立喷嘴清洗距离分别为60,80,100,120,140,160 mm时的流域模型进行射流流场的数值分析,结果如图7,8所示.

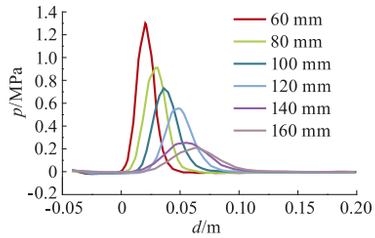


图7 导流距离为15 mm时不同清洗距离下被清洗件轴线上的压力分布曲线

Fig. 7 Axis pressure distribution curves of cleaned part at different cleaning distances(diversion distance is 15 mm.)

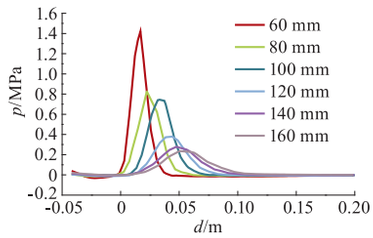


图8 导流距离为25 mm时不同清洗距离下被清洗件轴线上压力分布曲线

Fig. 8 Axis pressure distribution curves of cleaned part at different cleaning distances(diversion distance is 25 mm.)

从图7,8可以看出两者变化趋势基本相同,都呈现出随着清洗距离的增大,被清洗件轴线上压力逐渐递减,而清洗范围也有小幅度的增大. 当清洗距离为60 mm时,虽然打击在被清洗件的压力很高,但是相对清洗范围比较窄,就清洗效率而言,这种距离并不适合. 而当喷嘴与被清洗件距离达到140 mm及以上时,虽然清洗范围稍有增大,但清洗压力骤减,很难达到高质量的清洗效果. 因此,综合考虑清洗压力及清洗范围,80~120 mm的清洗距离最适宜.

4 结 论

1)当水流从导板式扇形喷嘴喷孔喷出后,冲击导流面,水流散射,形成具有高冲击力的窄角扇形形状喷雾,并增大了清洗面积.

2)随着导流式扇形喷嘴导流面倾角的增大,射流在被清洗件上的压力逐渐衰减,射流喷射距离越远;随着清洗距离的增大,被清洗件轴线上压力逐渐递减,而清洗范围小幅度增大.

3)当导流面倾角为20°,导流距离为15或25 mm,喷嘴清洗距离为80~120 mm时,导流式扇形喷嘴的清洗效果最佳.

参考文献(References)

[1] 薛胜雄. 高压水射流技术工程[M]. 合肥:合肥工业大学出版社,2006.

[2] 任建新. 物理清洗[M]. 北京:化学工业出版社,2000.

[3] 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.
YANG Zhixian, XIANG Mingming. Design and experiment of nozzle mechanism for ultra high pressure water stream[J]. Journal of Jiangsu University(natural science edition), 2015,36(5):522-526. (in Chinese)

[4] BERNOLD L E, TAI S L, KOO J K, et al. Automated eco-friendly road stripe removal system[J]. Automation in construction, 2010, 19(6):694-701.

[5] YARAVINTELIMA TH A, RAGHUNANDAN B N, MORÍÑIGO J A. Numerical prediction of nozzle flow separation: issue of turbulence modeling[J]. Aerospace science & technology, 2016, 50:31-43.

[6] ZHANG F, WANG X, LI J. Numerical investigation of flow and heat transfer characteristics in radial pre-swirl system with different pre-swirl nozzle angles[J]. International journal of heat & mass transfer, 2016, 95:984-995.

[7] 张建平,何海星,申强. 自动化钻杆内外壁清洗机的设计与应用[J]. 石油机械,2013,41(8): 32-35.
ZHANG Jianping, HE Haixing, SHEN Qiang. Design and application of automatic cleaner for inner and outer wall of drill pipe[J]. China petroleum machinery, 2013,41(8):32-35. (in Chinese)

[8] 李敬彬, 李根生, 黄中伟,等. 新型旋转射流多孔喷嘴流场的分析[J]. 流体机械, 2015,43(7):32-36.
LI Jingbin, LI Gensheng, HUANG Zhongwei, et al. Flow field study on a new kind swirling multi-orifices nozzle [J]. Fluid machinery, 2015, 43(7):32-36. (in Chinese)

[9] 祝效华, 吴丹, 杨兆中. 自进式多孔水射流钻头钻孔规律的试验研究[J]. 流体机械, 2016, 44(2):12-16.
ZHU Xiaohua, WU Dan, YANG Zhaozhong. Experimental study on drilling laws by self-advancing and multi-hole

jet bit[J]. Fluid machinery,2016, 44(2):12 – 16. (in Chinese)

[10] QIU T, SONG X, LEI Y, et al. Effect of back pressure on nozzle inner flow in fuel injector[J]. Fuel, 2016, 173:79 – 89.

[11] JEFFERS N, STAFFORD J, CONWAY C, et al. The influence of the stagnation zone on the fluid dynamics at the nozzle exit of a confined and submerged impinging jet[J]. Experiments in fluids, 2016, 57(2):1 – 15.

[12] 陈晓晨,邓松圣,郭联欢,等. 不同形状喷嘴内流场模拟分析[J]. 后勤工程学院学报, 2015(1):34 – 37,50.
CHEN Xiaochen, DENG Songsheng, GUO Lianhuan, et al. Simulation analysis of flow field inside different shaped nozzles[J]. Journal of Logistical Engineering University, 2015(1):34 – 37, 50. (in Chinese)

[13] 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.
WANG Guozhi, RAN Chunyan, DENG Bin, et al. Study on the jet characteristics of the remote flushing nozzle based on fluent[J]. Hydraulics pneumatics & seals, 2016,36(1):31 – 34,39. (in Chinese)

[14] 杜长河,范小军,李亮,等. 喷射角度和喷嘴数对旋流冷却流动与传热特性的影响[J]. 西安交通大学学报, 2016,50(4):1 – 6.
DU Changhe, FAN Xiaojun, LI Liang, et al. Influences of jet angle and jet nozzle number on flow and heat transfer characteristics of swirl cooling[J]. Journal of Xi′an Jiaotong University, 2016,50(4):1 – 6. (in Chinese)

[15] 莫丽,杨琪,刘海鲲. 钻杆外壁清洗射流流场的数值分析[J]. 流体机械,2015,43(2):24 – 28.
MO Li, YANG Qi, LIU Haikun. Numerical analysis for jet flow field on cleaning the outer wall of drill pipe[J]. Fluid machinery,2015,43(2):24 – 28. (in Chinese)

[16] 马东军, 万立夫, 李根生. 脉冲空化多孔射流钻头的结构设计研究[J]. 流体机械, 2016,44(4):23 – 28.
MA Dongjun, WAN Lifu, LI Gensheng. Study on structural design of pulsed cavitating multi-hole jet bit[J]. Fluid machinery,2016,44(4):23 – 28. (in Chinese)

[17] 高慧,宋宇宸,韩博. 可压缩轴对称冲击射流流场的数值模拟[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2012,36(1):80 – 84.
GAO Hui, SONG Yuchen, HAN Bo. Numerical simulation of compressible axisymmetric impinging jet[J]. Journal of China University of Petroleum(natural science edition),2012,36(1):80 – 84. (in Chinese)

(责任编辑　谈国鹏)