

新型中心体喷嘴流场数值模拟与结构优化

刘鲁兴 邓松圣 管金发 李国栋 姚 粟 姜玉泉

中国人民解放军陆军勤务学院油料系, 重庆 401331

摘 要:为实现储罐清洗工作的安全与环保,有必要将空化水射流清洗技术引入到储罐清洗中。对一种带有扩散角的中心体喷嘴进行研究,利用 **Fluent** 计算软件对不同扩散角的中心体喷嘴诱发空化射流的情况进行数值模拟,分析其压力、轴向速度和气相体积分数。模拟结果表明:在 15 MPa 的压力入口下含有扩散角的中心体喷嘴诱发空化的效果,明显优于不含扩散角的中心体喷嘴;同时中心体喷嘴因扩散角不同,其空化产生的效果也不同,扩散角为 15° 时中心体喷嘴诱发空化的效果最好。因此合理地选择中心体喷嘴的结构参数,可以更好提高储罐清洗的质量。

关键词:空化射流;中心体喷嘴;储罐清洗;数值模拟

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2019.04.019

Numerical Simulation and Structural Optimization of New Central Body Nozzle Flow Field

Liu Luxing, Deng Songsheng, Guan Jinfa, Li Guodong, Yao Su, Jiang Yuquan

Department of Oil. Army Logistics University of PLA, Chongqing, 401331, China

Abstract: In order to achieve the safety and environmental protection of the tank cleaning, the cavitation water jet cleaning technology is introduced into the tank cleaning work. A central body nozzle with a diffusion angle is studied. The Fluent calculation software is used to simulate the cavitation jet induced by the central body nozzles with different diffusion angles, and the pressure, axial velocity and gas phase fraction are analyzed. The simulation results show that the effect of cavitation induced by the central body nozzle containing the diffusion angle under the pressure inlet of 15 Mpa is significantly better than that of the central body nozzle without the diffusion angle. At the same time, the central body nozzle has different effects due to its different diffusion angles. When the diffusion angle is 15° , the effect of cavitation induced by the central body nozzle is the best. Therefore, a reasonable selection of the structural parameters of the central body nozzle can better improve the quality of the tank cleaning.

Keywords: Cavitation jet; Central body nozzle; Oil tank cleaning; Numerical simulation

收稿日期:2019-01-12

基金项目:重庆市基础科学与前沿技术研究专项基金(cstc 2017 jcyjAX 0166)

作者简介:刘鲁兴(1995-),男,山东济宁人,硕士研究生,主要从事空化水射流技术研究。

0 前言

储罐广泛应用于石油行业中,无论是成品油还是原油储存,储罐都具有相当重要的地位^[1]。由于油品中水分、无机盐、杂质、细菌、工作温度和沉降作用等原因,随着时间推移,会影响储罐储油的质量,使储罐堵塞,罐底板及内壁腐蚀生锈,严重时储罐会出现穿孔,导致油品泄漏,引起安全事故,对储罐产生不利影响^[2-4]。为保证油品质量,延长储罐使用寿命,储罐清洗必不可少^[5]。近年来,为实现储罐清洗工作的安全与环保,逐渐开展了对空化水射流清洗储罐的研究^[6]。

空化水射流是人为在喷嘴出口处诱发空化^[7-8],使射流产生空泡在冲击到靶材表面时发生溃灭,以达到清洗、切割或破碎物料的效果^[9-11]。根据空化原理,空化一般可通过三种方式获取:绕流型空化、剪切型空化和振荡型空化^[12-13]。中心体喷嘴则是产生绕流型空化的核心部件^[14]。早在 20 世纪 70 年代,Johnson V E J 等人^[15]就对中心体喷嘴展开了研究,随着水射流技术研究的发展,国内学者对于绕流型空化喷嘴也开展了研究。杨敏官等人^[16]在不同相对直径条件下,对嵌入中心体的空化水射流喷嘴进行了实验研究,发现空蚀效果与中心体相对直径有关,随着相对直径增大,空蚀程度越来越高;肖胜男^[17]提出将中心体喷嘴与异形喷嘴组合以产生更好

的空化射流效果的思路,发现异形出口的中心体喷嘴产生的流场中,空泡相延伸距离更长,异形出口的中心体喷嘴产生的空化射流效果更好;廖松等人^[18]将异性中心体与锥形喷嘴相结合进行数值研究,通过对喷嘴冲蚀能力、压力、气含率等因数的分析与比较,发现用 90° 锥形柱体的中心体与喷嘴相结合空化效果更明显。

为提高喷嘴的空化效果,增加喷嘴的冲蚀性能,本文在前人研究的基础上,对一种带有扩散角的中心体喷嘴展开研究,通过 Fluent 软件进行数值模拟,研究比较因扩散角度不同对喷嘴诱发空化效果的影响。

1 几何模型

图 1 为中心体喷嘴原理和结构图,其中图 1-a) 是中心体喷嘴结构图,在喷嘴中心置入一圆柱体,圆柱体的端面与喷嘴出口端面平齐、缩进或伸出一定距离;图 1-b) 是诱发空化原理图,流体在绕过中心体时形成尾流,从而产生空化气泡^[19];图 1-c) 和图 1-d) 分别是无扩散角喷嘴和含扩散角喷嘴结构简图。经研究,中心体直径 D_c 与出口直径 D_n 的比值在 0.5 ~ 0.8 之间空化效果较好^[20]。本文中心体内缩长度 L 、 D_c 、 D_n 的取值分别为 2、1、2 mm,为进一步比较不同扩散角的影响,在计算中扩散角 θ 取值分别为 0°、5°、10°、15°、20°、25°。

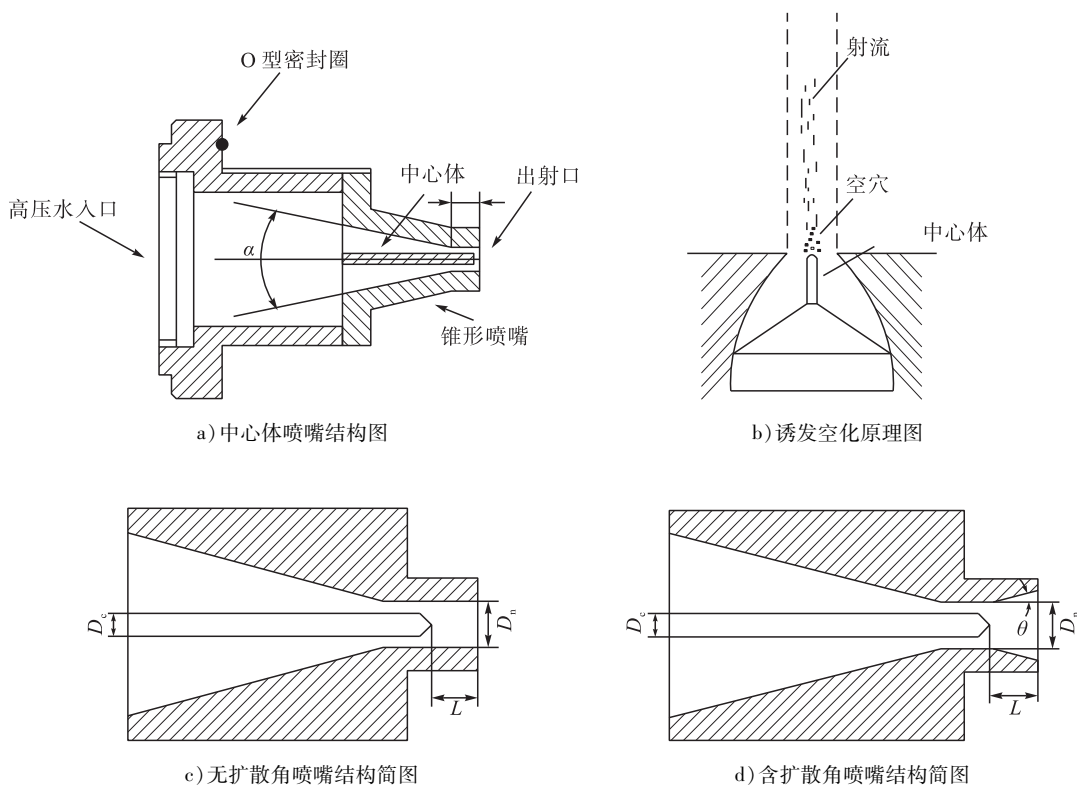


图 1 中心体喷嘴原理和结构图

2 计算模型及前处理

2.1 网格的划分

喷嘴的结构整体呈锥直型,网格的划分相对容易。构建二维流体计算域的网格图,即可准确模拟空化的产生。图2为含扩散角中心体喷嘴网格图,在喷嘴出口左侧为喷嘴的网格区,右侧区域设定为大气区,整体所包含的网格数约 1.5×10^4 个。同时对喷嘴收缩段、喷嘴出口处及近壁面处的网格进行适当加密。

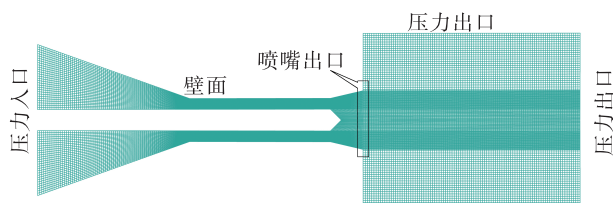


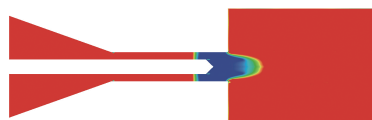
图2 含扩散角中心体喷嘴网格图

2.2 计算模型的选取

空化模型在实际应用过程中,数值计算的稳定性受到众多因素的影响,选择合理的空化模型尤为重要。Fluent 软件中提供了 Zwart-Gerber-Belamri、Schnerr and Sauer 和 Singhal et al 三种空化模型。综合比较三种空化模型, Singhal et al 模型的可操作性相对较差;另外两种模型虽然计算不够精细,但相对稳定;同时 Schnerr and Sauer 模型相较于 Zwart-Gerber-Belamri 模型计算更易收敛。本文选择 Schnerr and Sauer 模型^[21-22]进行数值仿真。

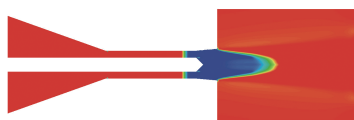
计算模型的体积分数方程为:

$$\frac{\partial(\alpha_p)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_p \mathbf{v}_m) = \frac{\rho_l}{\rho_m} \frac{\eta}{(1 + \eta\varphi)^2} \frac{d\varphi}{dt} + \frac{\alpha\varphi_v}{\rho_m} \frac{d\varphi_v}{dt} \quad (1)$$



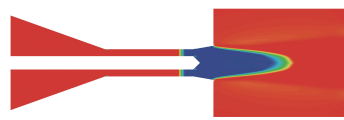
压力/Pa

a) $\theta = 0^\circ$



压力/Pa

b) $\theta = 5^\circ$



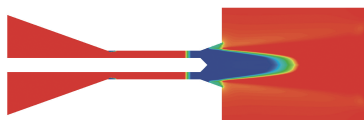
压力/Pa

c) $\theta = 10^\circ$



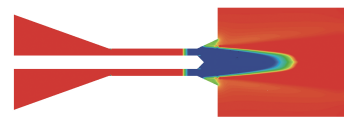
压力/Pa

d) $\theta = 15^\circ$



压力/Pa

e) $\theta = 20^\circ$



压力/Pa

f) $\theta = 25^\circ$

图3 不同扩散角喷嘴的压力云图

连续性方程为:

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_m \mathbf{v}_m)}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

动量方程为:

$$\frac{\partial(\rho_m \mathbf{v}_m)}{\partial t} + \mathbf{v}_m \frac{\partial(\rho_m \mathbf{v}_m)}{\partial x_j} = \frac{\partial \rho_m}{\partial x_i} + \mu_m \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial \mathbf{v}_m}{\partial x_j} + \frac{\partial \mathbf{v}_m}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

式中: ρ_m 为混合物密度, kg/m^3 ; ρ_v 为蒸气密度, kg/m^3 ; ρ_l 为水密度, kg/m^3 ; $\mathbf{v}_m$ 为混合物速度, m/s ; μ_m 为混合物黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; i, j 为张量下标; η 为质量转换系数; α_p 为气泡体积分; φ 为气泡质量, kg ; t 为时间, s ; x 为直角坐标轴。

2.3 边界的设定

利用 Fluent 软件读取划分好的网格,进行边界设定。

1) 喷嘴入口处边界设定: 入口边界选择 pressure inlet, 压力数值为 15 MPa; 流体介质为水和蒸气两种, 其中水的体积分数为 1; 水到蒸气之间的反应选择 cavitation, 水的饱和蒸气压为 3 540 Pa。

2) 喷嘴出口处边界设定: 出口边界选择 pressure outlet, 外部区域为大气, 压力数值为 101 325 Pa。

3) 壁面边界设定: 喷嘴壁面和中心体壁面均选择 wall, 勾选无滑移状态。

3 仿真结果及分析

将计算结果导入后处理软件, 为更清晰地显示空化区域的压力变化, 仅展现 3 540 ~ 101 325 Pa 的低压区域。压力超出最大值的部分, 按最大值 101 325 Pa 的区域颜色进行作图, 图3 为不同扩散角喷嘴的压力云图。

由图 3 可知,液体进入喷嘴后,在中心体末端产生绕流型空化,液体压力在此处达到水的饱和蒸气压 3 540 Pa,即在此处产生强烈的空化反应。通过图 3 可以看出,带有扩散角的喷嘴,中心体后的空化低压区范围明显大于无扩散角的喷嘴,不同扩散角喷嘴的空化低压区也存在差异。图 4 为不同扩散角喷嘴压力变化曲线图,可更清晰地比较不同角度下中心体后压力变化情况,中心体后压力即到达空化压力,与横坐标平行的曲线段即为达到空化压力 3 540 Pa 的区域。由图 4 可知,0° 扩散角喷嘴空化压力段长度 2 mm 为最小;扩散角为 10° 和 25° 时压力变化曲线基本重合,空化压力段长度为 5 mm;扩散角为 15° 的喷嘴空化压力段最长为 6 mm;在 15 MPa 的入口压力下,与其他几种扩散角的中心体喷嘴相比,扩散角 15°

时喷嘴产生空化低压区域最长。

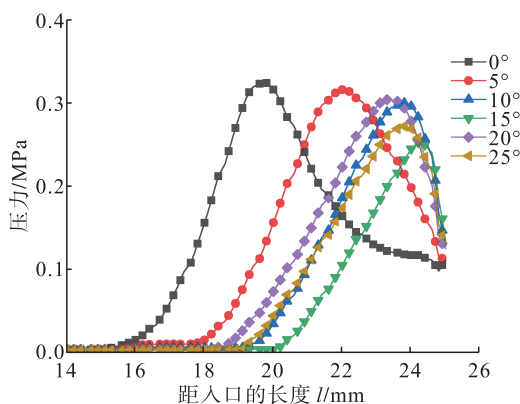


图 4 不同扩散角喷嘴压力变化曲线图

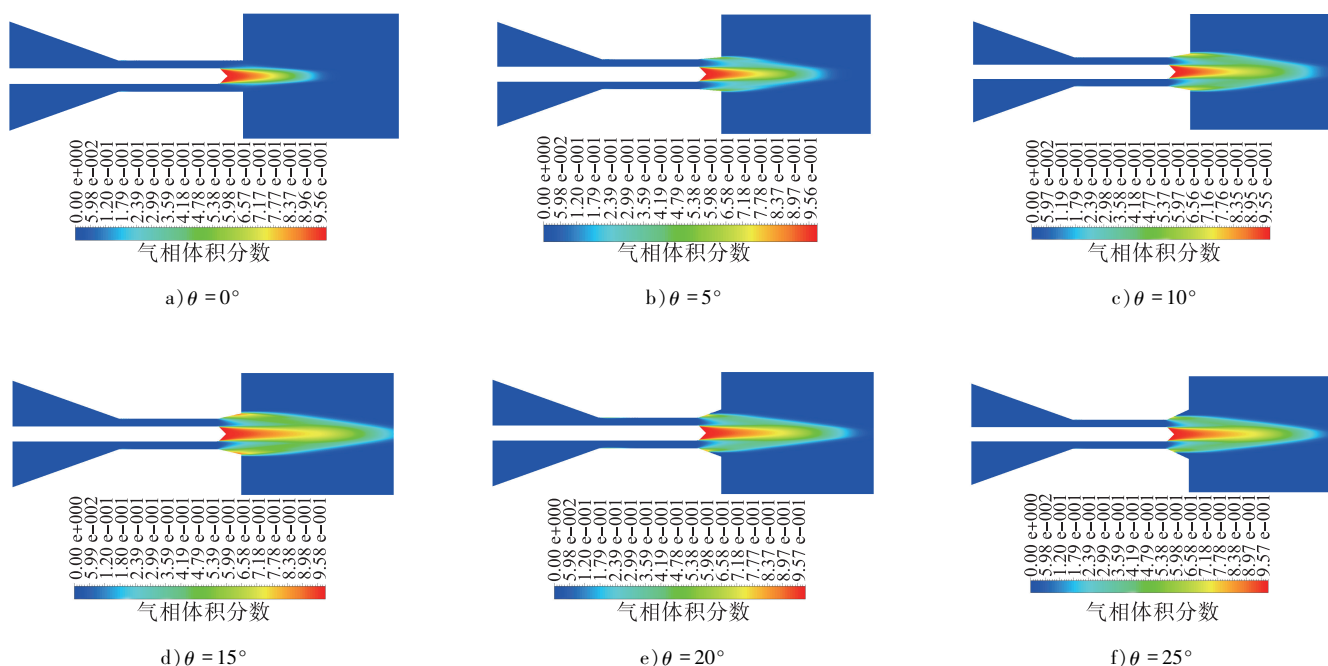


图 5 不同扩散角喷嘴的气含率云图

图 5 为不同扩散角喷嘴的气含率云图。由图 5 可知,中心体后所产生的气相体积分数较大的区域与图 3 中空化低压区域基本吻合。含扩散角喷嘴后的蒸气区域明显大于无扩散角喷嘴,且对于不同扩散角喷嘴,其出口处的蒸气区域大小也是不同的,扩散角为 15° 时蒸气覆盖范围相对更大。为更清晰地分析,做不同扩散角喷嘴气含率变化曲线,见图 6。由图 6 可知,所有喷嘴在中心体后的气含率变化趋势大致一致,即在中心体后气含率最高,随后气含率先相对缓慢下降,最后气含率快速变小直至为 0。不同扩散角喷嘴其气含率变化曲线存在差异,扩散角为 15° 时,喷嘴在中心体后气含率变化最缓慢,和其他几种喷嘴相比,在距离中心体相同位置处(即横坐标相同时),气含率最高。这和前文所分析的压

力变化曲线得出的结果完全吻合,即扩散角 15° 时喷嘴空化产生的效果最好。

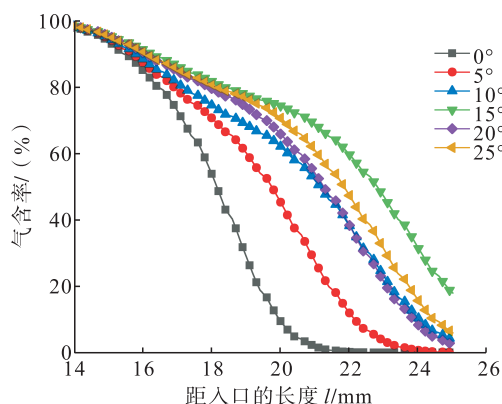


图 6 不同扩散角喷嘴气含率变化曲线图

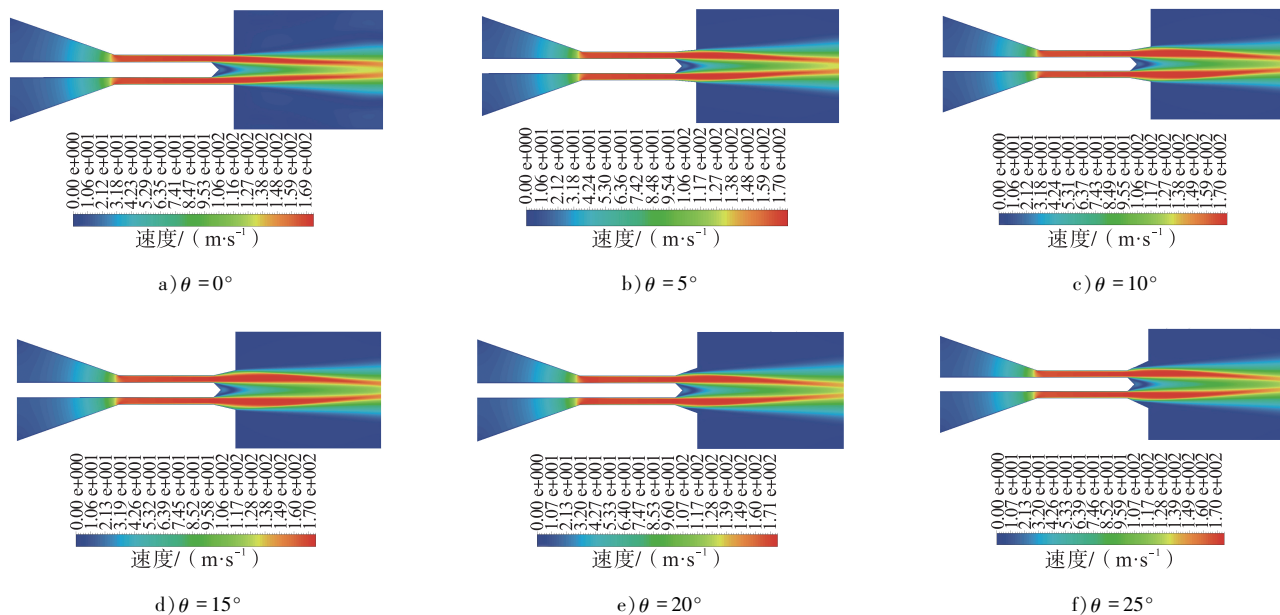


图7 不同扩散角喷嘴的速度云图

图7为不同扩散角喷嘴的速度云图。由图7可知,不同扩散角喷嘴的速度云图基本相同,喷嘴在圆柱段得到加速并以较高的速度射入到环境中。图8为不同扩散角喷嘴速度分布曲线图,可以清楚地看出射流进入圆柱段速度达到峰值,并保持一定的高速度向前流动,几种不同扩散角喷嘴到达的速度峰值均为175 m/s。当射流流过中心体末端,随着流动空间的相对增大,速度开始下降,但仍以较高的速度向前流动。当射流到达喷嘴出口位置,射入外界环境时,射流速度开始急剧下降。对比几种喷嘴速度变化曲线的差异,可以发现喷嘴扩散角15°时,在喷嘴出口后方同位置处的速度较其他几种喷嘴是最大的,其能量衰减相对最慢。

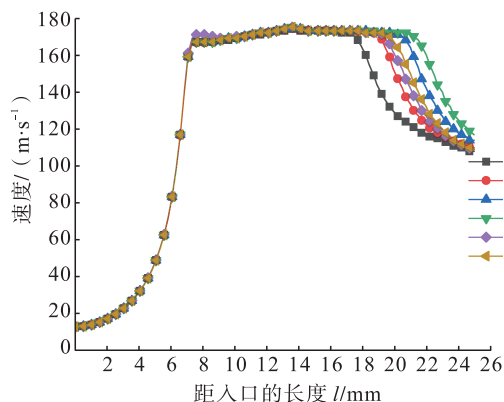


图8 不同扩散角喷嘴速度分布曲线图

4 结论

1) 本文对0°、5°、10°、15°、20°和25°的不同扩散角中心体喷嘴产生空化的过程进行了数值仿真,分析了喷嘴内部流场特性的变化情况。

2) 喷嘴入口压力为15 MPa时,含扩散角喷嘴诱发空化的效果明显优于不含扩散角喷嘴。

3) 含扩散角喷嘴因其扩散角不同,其空化产生的效果也不同。通过计算分析得出,扩散角15°时喷嘴诱发空化效果最好。

参考文献:

- [1] 宋生奎,张永国,王杰辉,等. 国内储罐清洗作业及对策[J]. 广州化工,2014,42(16):119-121.
Song Shengkui, Zhang Yongguo, Wang Jiehui, et al. Domestic Storage Tank Cleaning Operations and Countermeasures [J]. Guangzhou Chemical Industry, 2014, 42(16): 119-121.
- [2] 石熠,陈家庆,刘美丽,等. 大型立式储油罐机械清洗技术及其工程应用进展[J]. 油气储运,2015,34(2):128-133.
Shi Yi, Chen Jiaqing, Liu Meili, et al. Mechanical Washing Technology for Large Vertical Oil Storage Tanks and Its Engineering Application [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2015, 34(2): 128-133.
- [3] 祝超. 油罐的安全清洗[J]. 石油库与加油站,2009,18(1):22-23.
Zhu Chao. Safe Cleaning of Oil Tank [J]. Oil Depots and Gas Station, 2009, 18(1): 22-23.
- [4] 张维. 油罐清洗与罐底泥处理技术研究及应用[J]. 油气田环境保护,2011,21(6):18-21.
Zhang Wei. Studies and Application of Oil Tank Clearing and Tank Bottom Sludge Treatment Technology [J]. Environmental Protection of Oil & Gas Fields, 2011, 21(6):

- 18-21.
- [5] 周利坤. 油罐底泥清理系统关键技术研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2016.
- Zhou Likun. The Key Technology Research on Oil Sludge Tank Cleaning and Treatment System [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2016.
- [6] 王琳. 论储油罐机械清洗技术在油田的应用研究[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2013, 33(13): 61.
- Wang Lin. Discussion on Application of Mechanical Cleaning Technology of Oil Storage Tank in Oilfield [J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2013, 33(13): 61.
- [7] 赵瑞, 梁忠诚, 徐荣青, 等. 固壁面附近空泡溃灭研究[J]. 南京邮电大学学报(自然科学版), 2009, 29(1): 83-86.
- Zhao Rui, Liang Zhongcheng, Xu Rongqing, et al. Experimental Investigations of Laser-induced Cavitation Bubble Collapse Noise near Solid Boundary [J]. Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2009, 29(1): 83-86.
- [8] 刘鲁兴, 邓松圣, 管金发, 等. 不同入口形状中心体喷嘴诱发空化的模拟[J]. 煤矿机械, 2018, 39(12): 55-57.
- Liu Luxing, Deng Songsheng, Guan Jinfa, et al. Flow Field Simulation of Cavitation Induced by Central Body Nozzles with Different Inlet Shapes [J]. Coal Mine Machinery, 2018, 39(12): 55-57.
- [9] 胡影影, 朱克勤, 席葆树. 固壁空蚀数值研究[J]. 应用力学学报, 2004, 21(1): 22-25.
- Hu Yingying, Zhu Keqin, Xi Baoshu. Numerical Study of Cavitation Erosion on a Rigid Wall [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2004, 21(1): 22-25.
- [10] 胡影影. VOF方法的改进及空泡溃灭和空化流的数值研究[D]. 北京: 清华大学, 2001.
- Hu Yingying. Improvement of VOF Method and Numerical Study of Bubble Collapse and Cavitation Flow [D]. Beijing: Tsinghua University, 2001.
- [11] 贺照明. 机械瓣空化及空泡溃灭研究[D]. 北京: 清华大学, 2000.
- He Zhaoming. Research on Cavitation of Mechanical Heart Valve and Bubble Collapse [D]. Beijing: Tsinghua University, 2000.
- [12] 潘森森. 空化机理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.
- Pan Sensen. Cavitation Mechanism [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013.
- [13] 崔漠慎, 孙家骏. 高压水射流技术[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1993.
- Cui Moshen, Sun Jiajun. High Pressure Water Jet Technology [M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1993.
- [14] 卢晓江, 何迎春, 赖纬. 高压水射流清洗技术及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- Lu Xiaojiang, He Yingchun, Lai Wei. High Pressure Water Jet Cleaning Technology and Its Application [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006.
- [15] Johnson V E J, Lindenmuth W T, Conn A F, et al. Feasibility Study of Tuned-resonator, Pulsating Cavitating Water Jet for Deep-hole Drilling [J]. Petroleum, 1981(3): 22-28.
- [16] 杨敏官, 肖胜男, 康灿. 出口形状对中心体喷嘴射流性能的影响[J]. 流体机械, 2011, 39(5): 13-19.
- Yang Minguan, Xiao Shengnan, Kang Can. Influence of Outlet Profile on Performance of Central-body Nozzle [J]. Fluid Machinery, 2011, 39(5): 13-19.
- [17] 肖胜男. 新型中心体喷嘴射流特性研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2011.
- Xiao Shengnan. The Study of Jet Feature by a New Novel Central-body Nozzle [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2011.
- [18] 廖松, 邓松圣, 管金发, 等. 中心体空化喷嘴设计与数值仿真研究[J]. 天然气与石油, 2017, 35(4): 110-115.
- Liao Song, Deng Songsheng, Guan Jinfa, et al. Design and Numerical Simulation of Central-body Cavitation Nozzle [J]. Natural Gas and Oil, 2017, 35(4): 110-115.
- [19] 孙家骏. 水射流切割技术[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1992.
- Sun Jiajun. Water Jet Cutting Technology [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 1992.
- [20] 刘艳玲. 含中心体喷嘴非淹没空化射流调制研究[D]. 青岛: 中国石油大学, 2009.
- Liu Yanling. Modulation Study on Unsubmerged Cavitating Jet from Nozzle with a Centre Cylinder [D]. Qingdao: China University of Petroleum, 2009.
- [21] 王福军. 计算流体力学-CFD软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 63-108.
- Wang Fujun. Computational Fluid Dynamics-CFD Software Principles and Applications [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 63-108.
- [22] 雷传超, 邓松圣, 管金发, 等. 淹没型空化水射流流场数值模拟与冲蚀实验研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学版), 2015, 29(12): 71-76.
- Lei Chuanchao, Deng Songsheng, Guan Jinfa, et al. Flow Field Numerical Simulation and Erosion Experiment Research of Submerged Cavitating Water Jets [J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2015, 29(12): 71-76.