

大型储罐清洗喷嘴的数值模拟研究

方 舟, 杨剑锋*, 刘文彬

(北京化工大学 化工安全教育部工程研究中心, 北京 100029)

摘要:针对石油储罐机械清洗过程中射流发散严重、有效靶距过短、清洗效果差的问题, 现将一种含中心体式喷嘴应用到储罐清洗中。运用 Fluent 软件对含中心体的储罐清洗喷嘴内外流场进行了数值模拟仿真, 过程中选用 K- ϵ 紊流模型和 SIMPLEC 算法进行了数值计算, 采用 Mixture 多相流模型和非结构化网格对含中心体喷嘴和圆柱形喷嘴进行了对比模拟评价。研究表明, 含中心体喷嘴沿射流方向的轴心速度逐渐增大, 射流在计算域内未发散, 有效靶距得到了提高。相比于圆柱形喷嘴, 含中心体的喷嘴出口截面射流半径缩小了 13.7%, 聚束性得到了提高, 打击力得到了更好的保持, 因而能更好地满足大型储罐清洗的要求。

关键词:喷嘴; 水射流; 中心体; 数值模拟

中图分类号: TH6; TH122; O358

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2013)09-1082-04

Numerical simulation of large storage tank cleaning nozzles

FANG Zhou, YANG Jian-feng, LIU Wen-bin

(Chemical Safety Engineering Research Center of Ministry of Education,
Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: Aiming at the problems that jet divergence is serious, the effective target distance is short and cleaning effect is poor in the process of mechanical cleaning of oil tank, a new type of nozzle which has center cylindrical was investigated. The numerical simulation of the flow field inside and outside the tank cleaning nozzle with center cylinder was carried on with the software of Fluent, the K- ϵ turbulence model was used to establish a mathematical model. The water jet structure was simulated by fluent arithmetic. The effects of nozzle which has a center cylinder and cylindrical nozzle were evaluated on the Mixture multiphase flow model and unstructured mesh which used simulation evaluation. The results indicate that the speed of the nozzle with the center cylinder increases gradually along the stream direction, the jet does not diverge within the computational domain and the target distance is improved effectively. The exit jet radius of nozzle which has center cylinder is reduced by 13.7% compared with the cylindrical nozzle and the bunching of the jet is improved as well as the hitting power is better kept, so that it can meet the requirements of large storage tank cleaning better.

Key words: nozzle; water jet; center cylinder; numerical simulation

0 引 言

射流清洗是水射流的主要用途之一。水射流技术是从上世纪 70 年代发展起来的一项新的清洁技术。自 1972 年第一届国际水射流会议以来, 每次会议上发表的论文中, 水射流清洗技术方面的内容都占有相当

大的比重^[1], 水射流清洗技术一直以来都是国内外学者关注的热点。

在最初的空化射流研究中, 根据空化产生的条件, 即通过在射流中心形成低压区而使射流成为空化水射流。自从 V. E. Johnson 等人^[2]采用了中心体或转叶型喷嘴概念以来, 随着水射流技术研究的发展, 为了更

加有效地产生空化,国内外学者研究开发了多种形式的空化水射流喷嘴。

1968年,美国水航公司的 R. E. Kohl 发明了两种喷嘴^[3]。第1种喷嘴称为旋转叶片式喷嘴,它是在喷嘴下部的锥形收缩段内放置一个本身不动的旋转叶片,液体进入喷嘴内经过旋转叶片导流作用后喷出的射流变成旋转射流,射流中心压力降低,从而产生空化;第2种喷嘴称为中心体式喷嘴,在喷嘴前部出口处放置中心体,使射流在中心体周围分离而产生空化^[4]。但该发明并未用于储罐清洗研究上。

随着我国石油储罐大型化的发展趋势,储罐工业清洗已成为近几年的热点话题。工业清洗已不再是一种简单劳动,而是一门需要专业技术、专业设备的新兴产业。储罐罐底油泥厚度一般在1 m~2 m,即占全罐容积的5%~10%,其中大部分是可以回收的原油^[5]。

储罐清洗时喷枪一般从罐顶进入,由于储罐直径较大,对于射流的喷射距离及有效打击力就提出了更高的要求,只依靠增加压力来延长喷射距离不仅会带来成本的增加,在现场也会带来一系列的安全隐患。国内关于储罐清洗喷嘴的研究较少,只有山东大学陈颂英教授和浙江大学王乐勤教授对其进行了研究分析^[6-8],但两位教授主要是对于自激振荡脉冲射流喷嘴的结构进行研究,对于含中心体的喷嘴研究较少。

本研究主要对现行的含中心体的储罐清洗喷嘴进行模拟研究。

1 储罐机械清洗工艺设备

储罐机械清洗工艺主要分为原油移送、同种油清洗、温水清洗三大过程。首先将不含污泥的原油通过回收泵及管道移到备用储罐中,使储罐中原油液位降低到可以清洗的高度;当被清洗储油罐内流动性较好的原油基本抽吸完成,且罐内氧气浓度低于8%时,启动清洗设备对被清洗储油罐进行清洗。清洗油一般采用与储罐中相同种类的油,方便最终油的回收;利用同种油清洗能够将储罐中大部分附着物和难溶物清洗干净,但为了能将储罐彻底清洗干净,还需要进行温水清洗过程。系统将水通过清洗泵和热交换器进行加压加温后,提供给清洗机,清洗机利用温水对储罐内部各个地方进行喷射清洗,油水混合物输送到油水分离器中分离,油通过回收泵抽到临界罐中,水在油水分离器中再经过一次加热继续进行循环。如此循环,边加热边进行清洗,最终把残油移送干净。

储罐机械清洗设备主要由回收泵、清洗泵、换热

器、过滤器、油水分离器、喷枪等组成,其中喷枪是整套设备的核心设备,而喷嘴是喷枪的主要配件,喷嘴射流冲击油泥表面,它的作用直接影响清洗的最终情况,在同等压力流量下,合适的喷嘴形状不仅可以提高清洗效率,还可以提升清洗效果。

2 清洗喷嘴型式

含中心体喷嘴如图1所示,喷嘴由圆柱形外壳和圆锥形中心体组成,中心体可与出口截面齐平,也可缩进出口截面,内部中心体前端为锥直型,后端为圆柱型,周身有6个翅片对称排列,主要防止射流经过时周身抖动。射流从喷嘴射出,由于中心形成负压,射流集束性较好,能量主要由轴线传递,径向较少,故能量集中,适合远距离清洗。

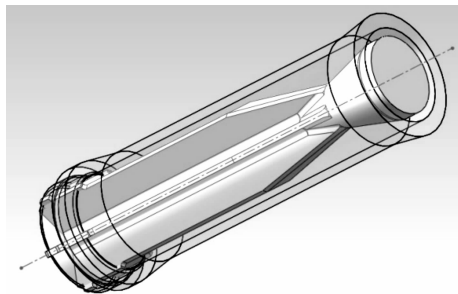


图1 含中心体喷嘴模型

3 射流流动模型

水通过喷嘴喷射到空气中,属于空气和水的轴对称两相混合流动。在两相射流中由喷嘴出口断面之基本段的动量方程^[9]:

$$\int_0^A p_B u_x^2 (1+n) d_A = I_0 \quad (1)$$

$$I_0 = m_B + m_n u_n \quad (2)$$

式中: I_0 —喷嘴出口断面上射流的动量,为空气的动量和混合物动量之和; m_B —空气的质量流量,kg/s; m_n —水的质量流量,kg/s; u_B —喷嘴出口处的空气的速度,m/s; u_n —喷嘴出口处水的速度,m/s; n —射流边界层中混合物的质量分数; p_B —空气的密度,kg/m³; u_x —边界层中任一点的速度,m/s; p_n —混合物的密度,kg/m³; A —射流断面面积,m²。

由于所研究的是轴对称模型,则有:

$$A = \pi r^2, d_A = 2\pi y d_y \quad (3)$$

现取无因此坐标 $\tau = y/r$, 则 $d_A = 2\pi r^2 \tau d_\tau$, 将该式带入前式,且空气的密度在射流中不变化,则有:

$$p_B u_m^2 A^2 \int_0^1 \left(\frac{u_x}{u_m} \right)^2 (1+n) \tau d_\tau \quad (4)$$

式中： u_m —射流轴心线上的速度，m/s。

在一般的射流情况下，在喷嘴出口处初始浓度为： $n_0 = m_n / m_B$ ，这里存在两个极限状态，入口处空气流量为 0。

4 仿真模型的建立

本研究采用商业软件 Fluent 对清洗喷嘴内、外部进行仿真模拟，前期利用 Gambit 软件对计算域进行网格划分和边界条件设置。本研究建立了一个相比喷嘴大很多的矩形区域进行外流场的模拟。

由于喷嘴形状较为规则且为轴对称，本研究采用二维分析方法，画出一半网格。本研究使用非结构化网格进行网格划分，外流场面积为 $0.5 \times 0.1 \text{ m}^2$ 。考虑到入口处管径收缩，对入口处进行网格加密，一半的图形网格数为 55 044。

本研究利用 Fluent 读取 Gambit 网格，使用混合模型中 Mixture 进行模拟计算，速度压力耦合求解方式采用 SIMPLE 格式，湍流模型采用 $K-\varepsilon$ 模型。入口边界取压力入口条件，入口压力为 0.55 MPa，将管流考虑成充分发展，其核心湍流强度采用经验公式^[10-11]：

$$I = 0.16 (Re_{DH})^{-1/8} \tag{5}$$

式中： Re_{DH} —相应水力直径条件下的雷诺数。

水力直径定义为流通面积与润湿周长比值的 4 倍。出口边界设为压力出口边界，压力为大气压即可，近壁面上采用标准函数法处理。

5 计算结果分析及对比

5.1 含中心体喷嘴模拟分析

模拟的含中心体喷嘴的射流速度图如图 2 所示，从图 2 中可以看出，由于内部中心体的影响，在设定的计算域内，轴心速度小于外围速度，但轴心速度有逐步增大的趋势，在喷距小于 10 倍管径的计算域内，轴心速度并没有达到最大。

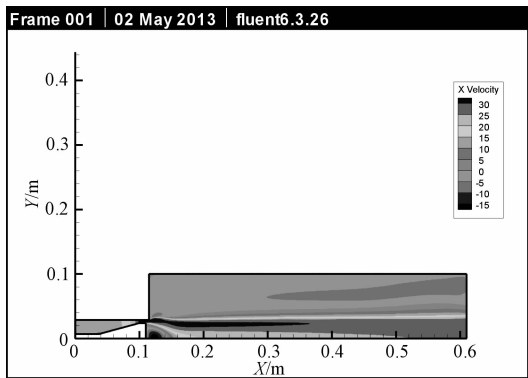


图 2 射流速度图

喷嘴出口局部放大的矢量图如图 3 所示，从图 3 中可以看出，从喷嘴出来的射流存在射流区、漫流区外，还存在大面积回流区。当水从喷嘴口喷射出来时，由于内部产生回流区，外部压力大于内部压力，致使水流先向轴心聚集，而减少发散，使射流保持相同打击力的情况下，射流长度增加，更有利于大型储罐的清洗。

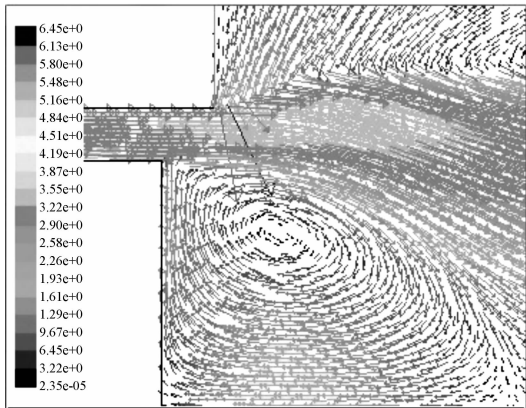


图 3 喷嘴出口局部放大的矢量图

5.2 两种喷嘴对比分析

圆柱形喷嘴是现在最为常用的射流清洗喷嘴，它与含中心体喷嘴的射流情况对比如图 4、图 5 所示。含中心体喷嘴与圆柱形喷嘴在同等入口压力条件下，出口截面处的轴向速度图如图 4 所示，两者的出口截面压力对比图如图 5 所示。

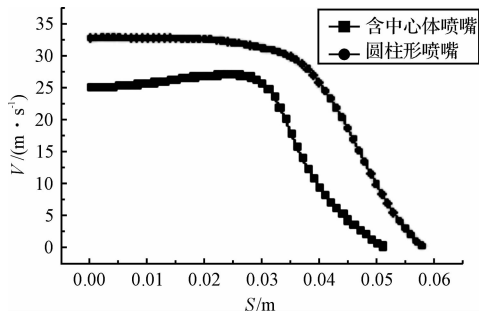


图 4 喷嘴出口截面速度对比图

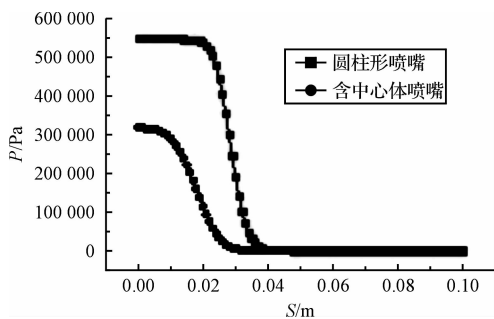


图 5 喷嘴出口截面压力对比图

含中心体喷嘴的轴心速度在离开涡旋区之后逐

渐增大,由于计算域的限制,最大轴心速度并未出现,可以看出,含中心体喷嘴相比于圆柱形喷嘴,射流核心速度的长度得到了提升,也就提高了射流有效打击距离。

从图4和图5中可以得出含中心体喷嘴与圆柱形喷嘴的射流在出口截面上有效射流半径分别为0.051 m和0.058 m,含中心体喷嘴较圆柱形喷嘴集束性提高了13.7%。圆柱形喷嘴轴心处速度最大,但是随着径向距离的增加,轴向速度逐渐减小直至为0;而在计算域内含中心体喷嘴的喷嘴速度最大处并未出现在轴心处,而是离轴心0.024 m处,速度大小为27.48 m/s,这说明轴心速度并未达到最大,最大速度出现在计算域外的区域中。

从以上分析中可以看出,含中心体喷嘴在截面上的射流半径小于圆柱形喷嘴,其集束性要明显好于圆柱形喷嘴,相比于圆柱形喷嘴,其射流的发散程度较小,能量集中,保持了更好的打击力,更能满足大型储罐清洗的要求。

6 结束语

含中心体喷嘴的出口射流由于内部产生负压,具有较好的集束性,在10倍管径长度的计算域内,最大速度还未出现在轴心处。相比于圆柱形喷嘴,出口截面射流半径缩小了13.7%,核心速度增长,集束性得到了提高,打击力得到了更好的保持,更有利于大型储罐的清洗。

由于模拟计算域有限,射程提高的长度还需要在后期的实验中进行研究,以便研究者对储罐清洗喷嘴进行全面的分析和评价。

参考文献(References):

- [1] WILLIAMS T J, JONES R T. Modeling the electrostatic ignition hazards associated with the cleaning of tanks containing flammable atmospheres[J]. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, 2001, 14(2): 129-133.
- [2] JOHNSON V E, KOHL J. Tunneling fracturing drilling and mining with high speed water jets utilizing cavitation damage [C]// Proceedings of the 1st International Symposium University of Warwick, Cbrentry, England: [s. n.], 1972: 82-87.
- [3] CONN A F, RADTKE R P. Cavitating bit jets promise faster drilling for deep hole operations [J]. **Oil & Gas**, 1977 (75): 129-146.
- [4] 刘艳玲. 含中心体喷嘴非淹没空化射流调制研究[D]. 北京: 中国石油大学石油工程学院, 2009.
- [5] 薛胜雄, 王永强, 巴胜富. 以油洗油的清罐设备与技术研究[J]. **流体机械**, 2011, 39(7): 6-9.
- [6] 王乐勤, 王循明, 徐如良. 低压大流量自激振荡脉冲射流喷嘴结构参数优化研究[J]. **流体机械**, 2004, 32(3): 7-10.
- [7] 曲延鹏, 陈颂英, 李春峰. 低压大流量自激脉冲清洗喷嘴内部气液两相流数值模拟[J]. **山东大学学报**, 2006, 36(4): 16-20.
- [8] 李江云, 王乐勤, 徐如良. 低压大直径喷嘴自激脉冲射流空化模型[J]. **工程热物理学报**, 2005, 26(3): 438-440.
- [9] 薛胜雄. 高压水射流技术工程[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.
- [10] 董增勇, 李 伟. 微型动静压轴承 FLUENT 仿真研究[J]. **轻工机械**, 2012, 30(3): 36-39.
- [11] 于 勇. **Fluent 入门与进阶教程**[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2008.

[编辑: 张 翔]