

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2014.02.012

危险流体输送装置 RFD 的空化性能

李江云, 关 凯, 王 健, 舒吉龙

(武汉大学 土木建筑工程学院, 武汉 430072)

摘 要: RFD(reversed flow diverter)是一种用于输送危险流体的免维修输送装置,由于在装置服役期内,人体无法近距离接触维修,因此必须避免运行中发生空化等威胁系统安全运行的工况。文中基于三维定常流控制方程,采用 k- ϵ 湍流模型及多相流空化模型对不同 RFD 结构参数和操作参数进行了仿真。计算工况首先考察了基于不同背压的 RFD 喷嘴直径和压冲压力对出水流量和水力效率的影响;其次,在最佳压冲压力范围内,考察了 2 种 RFD 直径比和 3 种背压下的初生空化发生时刻,认为相同条件下,RFD 喷嘴直径比越小,背压越大的装置,抗空化效果越好,并提出了避免发生空化的操作压力范围,从而为 RFD 装置的工程应用提供了依据。

关键词: RFD; 流体动力空化模型; 数值仿真; 免维修

中图分类号: TK72

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2014)02-081-09

Study of cavitation of RFD for hazard liquid transportation device

LI Jiangyun, GUAN Kai, WANG Jian, SU Jilong

(School of Civil and Architectural Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: RFD(reversed flow diverter) is a kind of maintenance-free pumping system which is useful for transferring hazardous liquid. The safety and reliability of the system must be guaranteed because any form of biological contact is not possible during its service period. Based on the 3D steady flow control equations, k- ϵ turbulence model and cavitation model, RFD structure parameters and operating parameters have been studied in the paper. Firstly, the numerical simulation examines the effects of the kinds of nozzle diameter, RFD back pressures and operating pressures to the outlet flow and efficiency. Secondly, within the range of RFD driving pressure, initial cavitations are inspected under 2 kinds of RFD diameter ratio and 3 kinds of back pressure. It is believed that under the same conditions, the smaller RFD nozzle diameter ratio is, the greater the back pressure is, and the better anti-cavitation effect would be. At last, the optimum and non-cavitation operating pressure range are promoted which provides the basis for the RFD device application in industry.

Key words: RFD; fluidic power; cavitation model; numerical simulation; maintenance-free

RFD(reversed flow device)装置是一种依靠流体动力输送介质的免维修流体输送装置。如图 1 所示,其工作原理主要是利用压缩空气作为驱动力,通过真空喷射器和压缩喷射器将脉冲气体转

换为脉冲液体,最后在周期性的脉冲液体驱动下,由 RFD 间歇性地将液体送输送至目的地。由于完全采用流体动力,装置不含运动部件,因此适用于需要免维修的危险流体输送场合。前英

收稿日期:2013-08-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51179133/E0906)

作者简介:李江云(1967-),女,武汉大学教授,博士,主要从事流体输送及运行研究,(E-mail) lijy@whu.edu.cn.

国核燃料有限公司(BNFL)70年代初开始研发此项技术,其专利转让到美国后,BNFL与AEAT合作对该技术进行了研发和推广,首先对用于输送和搅拌的400多套流体装置进行设计、制造及性能试验;其次对流体原理进行研究以进一步开发流体动力技术(power fluidics)在其他领域的应用,其研究为解决不同组合型式的流体装置尤其是RFD提供了一定的试验经验及理论支持。由于实际装置在材料、加工及不同几何特性上与试验装置的区别,往往使其装置性能与研发基地的试验数据发生偏差,因此仍需要对每一套工业装置进行原型试验^[2-5]。其后处理厂中利用RFD进行放射性核废料液体(或泥浆)的输送(transport)、搅拌(mixing)、取样(sampling)已有30多年的历史^[6-7]。中国从90年代开始关注该项技术,并在设计领域与原理试验方面取得了初步成果^[8-12]。由于RFD装置在服役期内,人体无法近距离接触维修,因此必须避免运行中输送液体因空化而造成的效率下降、噪声及振动等威胁系统安全的运行工况。目前尚未见到相关文献,为此,文中拟针对特定的RFD装置设计,重点讨论RFD运行中空化发生条件,为RFD装置的工业应用提供理论依据。

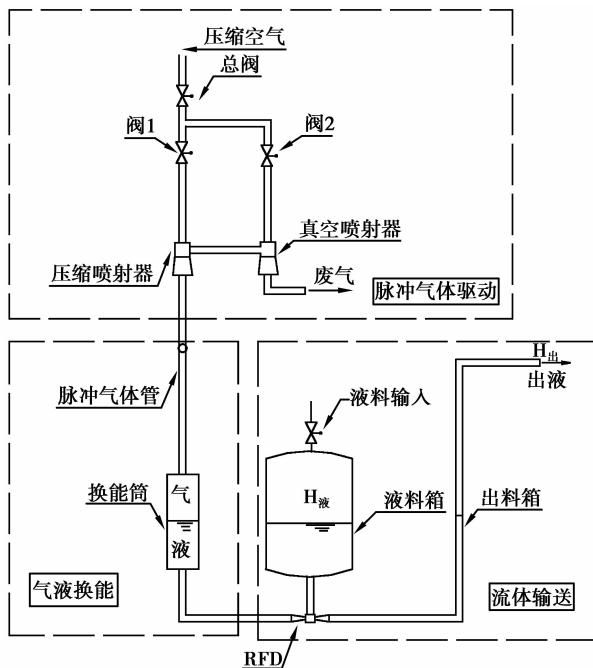


图1 RFD装置组成示意图

2 模型选择、网格划分及边界条件

2.1 模型选择

RFD具有与射流泵相似的结构(见图2),设计工况下,在压冲阶段其上喷嘴工作流体将直接进入下喷嘴,吸入管不产生或很少产生引射流量。因此RFD仿真模型的选择可以借鉴射流泵数值模拟经验^[13]。大量研究表明k- ϵ 模型在模拟射流泵时有较好的精度和稳定性;关于空化问题,基于王国玉的广义密度理论^[14],将液、汽视为混合相,依据气泡增长模型式(1)及空化发生标准式(2)计算气泡空化凝结的半径,并由此计算混合密度,采用混合模型求解^[15]。

rayleigh-plesset 方程:

$$\frac{P_B(t) - P_\infty(t)}{\rho_l} = R \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 + \frac{4v_l}{R} \frac{dR}{dt} + \frac{2\gamma}{\rho_l R}, \quad (1)$$

式中: P_B 为气泡表面压力; P_∞ 为当地远场压力; ρ_l 为液相密度; R 为空泡半径; γ 是表面张力。空化判别标准:

$$\frac{\partial u}{\partial x} > \frac{P - \bar{P}_V}{2\mu}, \quad (2)$$

式中 \bar{P}_V 是替代饱和蒸汽压 P_V 的经验值,与温度、表面张力和吉布斯自由能有关。

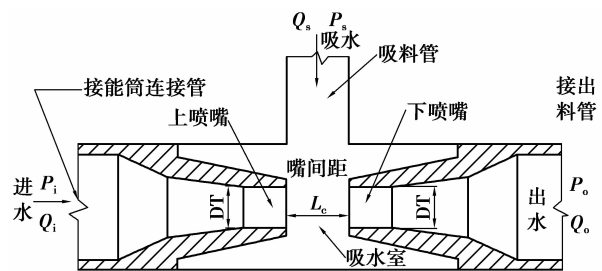


图2 RFD内部结构示意图

2.2 网格划分

RFD是整套装置中最关键的输送部件,包括上、下喷嘴、吸水室以及进料管、出料管等。其外部结构类似三通,由于运行时RFD内部为周期性的正、反向流动,因此采用对称的上、下喷嘴,嘴间距是优化运行的关键尺寸。根据优化设计得出的RFD进行物理域造型和结构分块(见图3),获得了如图4

所示的高质量正交网格。

2.3 边界条件

RFD 单体边界有 3 个端口,将 RFD 上游进口及吸料管设为压力入口边界 (pressure inlet),RFD 出料管设为压力出口边界 (pressure outlet)。为保证 RFD 三端管流充分发展,将上、下游的进、出口设置在距 RFD 上、下喷嘴大约 1 m 远处,RFD 进料管取 0.5 m 远处。

2.4 计算处理

实际应用中,空化模型时须采用绝对压力,迭代时亚松驰因子可设为气体体积分数为 0.2~0.3,气泡质量采用 0.1,以保证稳定的收敛速度。

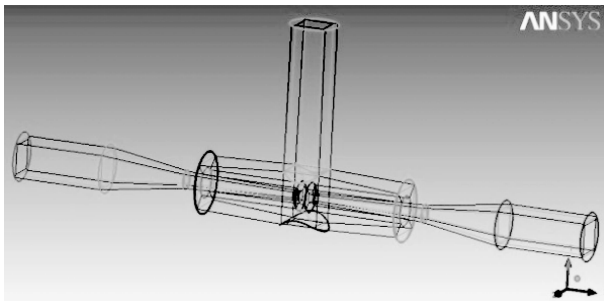
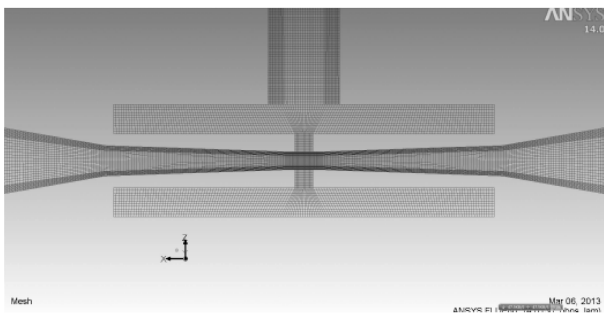
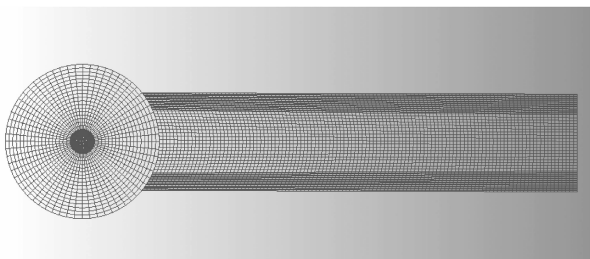


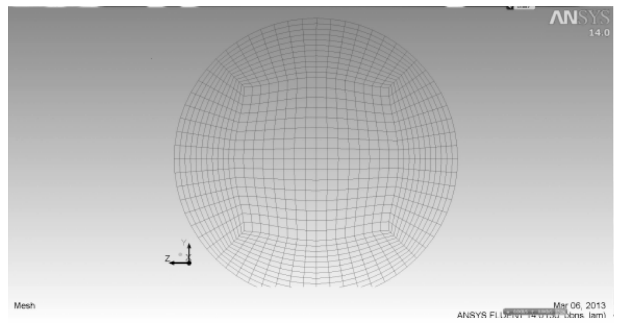
图3 RFD 单体网格划分块的生成



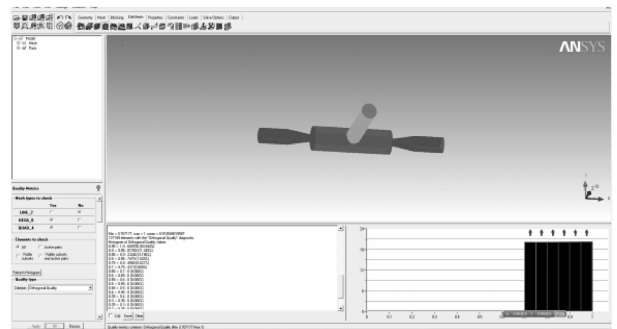
(a) RFD 单体纵剖网格效果



(b) RFD 单体横剖网格效果



(c) RFD 单体喷嘴处网格效果



(d) RFD 单体网格正交性参数

图4 RFD 网格效果图

3 压力参数对性能影响仿真试验

3.1 仿真试验方案

笔者前期研究中已获得 RFD 关键尺寸的配套关系^[13],文中就 RFD 工作压力、出口背压等运行因素对 RFD 空化发生条件进行仿真分析,设计仿真试验,并考虑到空化模型的计算量,对 3 种喷嘴直径 d_i ,压力为 0.2~0.5 MPa 范围的约 10 种压冲压力 P_i 以及 3 种出料管背压 P_o (10、15、20 m) 进行仿真,考查各压力因子对 RFD 压冲流量 Q_o 及水力效率 η 等运行特征的影响,观察并统计初生空化对应的压力参数。

3.2 仿真分析

3.2.1 压冲参数的影响

根据对 3 种 RFD 上喷嘴直径 (由小到大为 d_1, d_2, d_3) 的仿真分析,压力参数对出流量和效率的影响呈现了相同的变化趋势。以 d_2 为例,随着压冲压力 P_i 的增大,出流量 Q_o 的增加呈现先快后慢直至平稳的趋势,且背压 P_o 越高出流量 Q_o 越小 (见图 5); 分流比则呈现先增大后减小,即先分流后引射最后又出现分流的现象 (见图

6),且随出料管背压 P_0 的增加出现引射现象的工作压力 P_i 范围越窄,原因是当压冲压力 P_i 较小时,上喷嘴处未形成引射,RFD 上、下喷嘴之间有部分流体分流至液料箱,而加大 P_i 后,喷嘴速度提高,出口压力下降形成负压产生引射(分流比上升),而当引射增加到下喷嘴的接受工作和引射水流的极限后,下喷嘴由于流速过高,可能发生空化,水流冲击损失和相变的耗能显著,并形成阻力,RFD 重新出现分流现象(分流比下降),而这种分流比先增后减的现象会因为 RFD 出口背压 P_0 的增加变得更加显著。

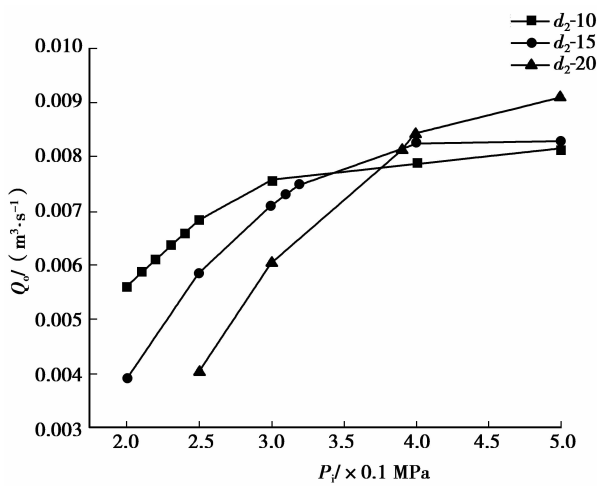


图 5 RFD- d_2 在不同背压下压力-流量曲线

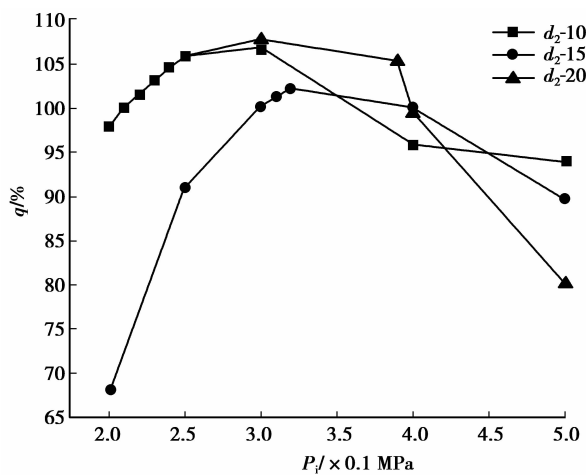


图 6 RFD- d_2 在不同背压下压力-分流比曲线

如图 7 所示,随压冲压力 P_i 增加,效率曲线呈先增后减趋势且有极大值,在 P_i 增加初期,效率随装置平均流量 Q_{av} 的增大快速上升,但当 P_i 增加到

一定程度后,下喷嘴产生拥堵直至产生空化,过流量开始下降,RFD 内部的能量损耗上升,效率降低。在不同压冲压力 P_i 下的 RFD 背压 H_0 与效率曲线如图 8 所示,表示有 1 个最优的压冲压力 P_i 使得效率最高(本例 0.3 MPa),且随背压加大,效率先升后降,即具有效率极值。

由此可见,无论是压冲压力还是 RFD 出口背压,均有 1 个流量和效率均较高的范围,取其交集,结合分流比接近 1 为控制空化发生的假设,RFD 应在效率曲线的高效区范围(最高效率 80% 范围)运行,计算举例见表 1 所示。由于该运行范围未考虑空化发生的限制,而在免维修的流体输送系统中,空化的危害是显而易见的,因此必须进一步讨论如何通过控制运行中的压力参数,以防止空化的产生。

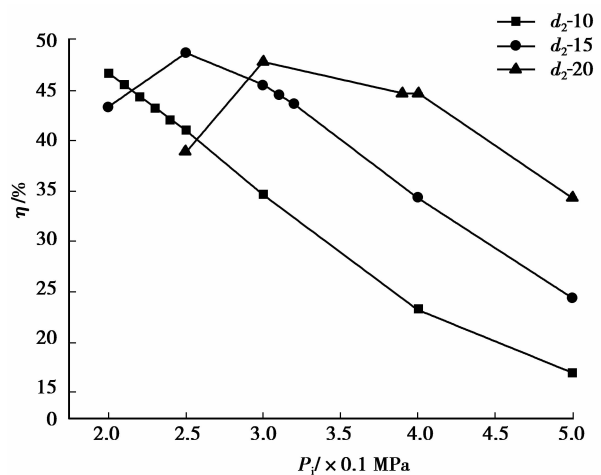


图 7 RFD- d_2 在不同背压下压力-效率曲线

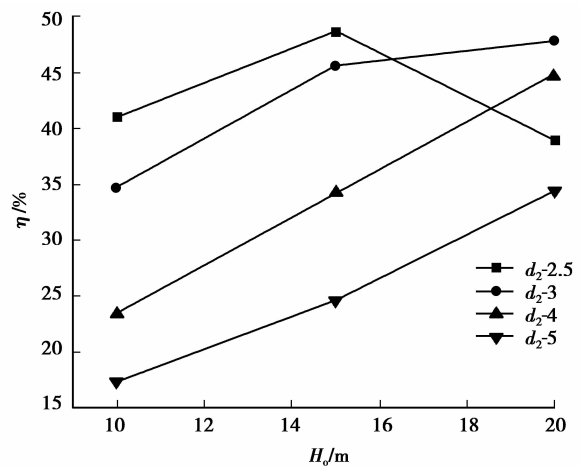


图 8 RFD- d_2 在不同 P_i 下的背压-效率曲线

表1 3种喷嘴直径的最佳压力范围

喷嘴直径 d_i/mm	出料管背 压 P_o/m	满足流量最优的范围		满足效率最优的范围		压冲压力范围 $/\times 0.1 \text{ MPa}$
		压冲压力 $P_i/\times 0.1 \text{ MPa}$	平均流量 $Q_{av}/(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$	压冲压力 $P_i/\times 0.1 \text{ MPa}$	效率/ $\%$	
d_1	10	2.0~5.0	3.74~4.67	2.0~3.0	47.6~38.0	2.0~3.0
	15	2.5~5.0	3.51~4.39	2.0~3.5	39.1~48.9	2.5~3.5
	20	3.0~5.0	3.30~4.13	2.5~4.5	37.8~47.3	3.0~4.5
d_2	10	2.0~5.0	4.20~6.00	2.0~3.0	37.4~46.8	2.0~3.0
	15	2.5~5.0	4.51~5.64	2.0~3.5	40.0~48.7	2.5~3.5
	20	3.0~5.0	4.49~5.61	2.5~4.8	29.2~36.5	3.0~4.8
d_3	10	2.0~4.5	5.35~6.96	2.0~2.5	36.2~45.3	2.0~2.5
	15	2.5~4.5	5.34~6.68	2.0~3.2	37.5~46.9	2.5~3.2
	20	3.0~5.0	4.66~5.82	2.5~4.0	35.1~43.9	2.5~4.0

3.2.2 喷嘴直径因子影响

在所讨论的 RFD 喷嘴直径范围内,压冲压力 P_i 一定时(如 $P_i < 0.3 \text{ MPa}$),喷嘴直径越大,流量越大,而当压冲压力增加到一定程度(如 $P_i > 0.4 \text{ MPa}$)之后,在扬程较低时,平均流量随着喷嘴直径的增长速度减缓,且当背压增大至 20 m 后,流量随喷嘴直径的增大呈现先增后减的趋势。这种现象发生的原因是,压力过大后 RFD 首先在下喷嘴发生空化,此时如果背压较低,流量可继续增大,而当背压到达一定高度时,阻力及空化的原因将降低 RFD 输水能力。相对同样的喷嘴直径而言,抗空化性能越好,其输水能力越强,因此研究并揭示 RFD 的空化性能是非常重要的。

上述分析中,RFD 工作的最优组合参数如下:喷嘴直径比为 3 时,压冲压力 P_i 约为 0.36 MPa,出口背压 H_o 为 15 m;此时,RFD 的效率约为 33%,平均流量约为 $5 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

4 压力参数对空化影响仿真试验

4.1 空化现象数值仿真分析

前文针对 3 种喷嘴直径的 RFD 进行了不同压冲压力和出口背压的数值仿真,通过分析 RFD 内部的流场和压力场对出流量和效率的影响,预测其空化发生范围。标况下,如场内的最低压力达到 -0.0965 MPa ,则认为 RFD 内部发生了空化,以下针对 2 种 RFD 直径比(RFD 三端直径与喷嘴直径为直径比),进行初生空化的仿真,部分结果见表 2 所示。计算发现,较小的直径比对空化防护有利。

表 2 显示了 2 种直径比 d_o/d_i 发生空化的临界压力条件,图 9 和图 10 分别显示了当背压为 10 m 时,直径比 $d_o/d_i = 3.1$ 和 4.3 时的 RFD 压冲压力分别为 0.25 MPa 和 0.21 MPa,说明直径比小的 RFD 比较不容易发生空化,由于直径比小的 RFD 下喷嘴到出料管的水力损失较大,当引射流体与工作流体汇合后,流速动能的增加受到限制,抑制了压力的过度降低,因此抑制了空化的发生。反之,相同的压冲压力下,出料管背压越大,下喷嘴入口的负压也将受到抑制,空化较不容易发生。

表 2 RFD 仿真结果空化分析表

RFD 直径比 d_o/d_i	压力参数			仿真分析		
	出料管背压 P_o/m	压冲压力 $P_i/\times 0.1 \text{ MPa}$	吸料管端压力 $P_s/\times 0.1 \text{ MPa}$	空化现象	效率/%	平均流量 $Q_{ra}/(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$
3.1	10	2.4	0.12	无	42.14	5.680
		2.5		初生	41.08	5.796
	15	3.1		无	44.59	5.523
		3.2		初生	43.75	5.613
	20	3.9		无	44.72	5.453
		4.0		初生	44.72	5.607
4.3	10	2.0	0.12	无	46.34	6.746
		2.1		初生	45.27	6.962
	15	2.6		无	46.17	6.230
		2.7		初生	47.43	6.676
	20	3.4		无	43.53	5.652
		3.5		初生	43.34	5.822

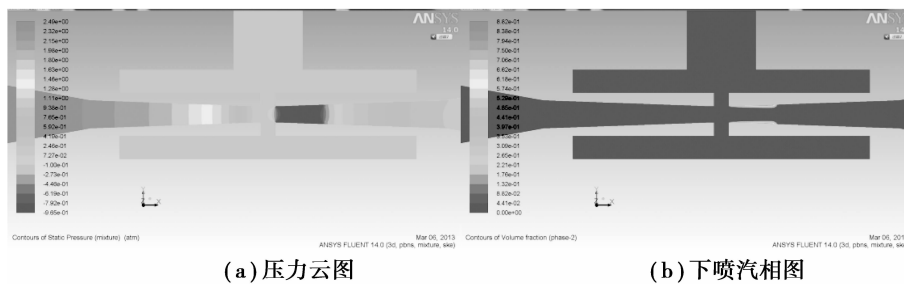


图 9 RFD($d_o/d_i=3.1$)空化现象 ($P_i=0.25 \text{ MPa}, P_o=10 \text{ m}$)

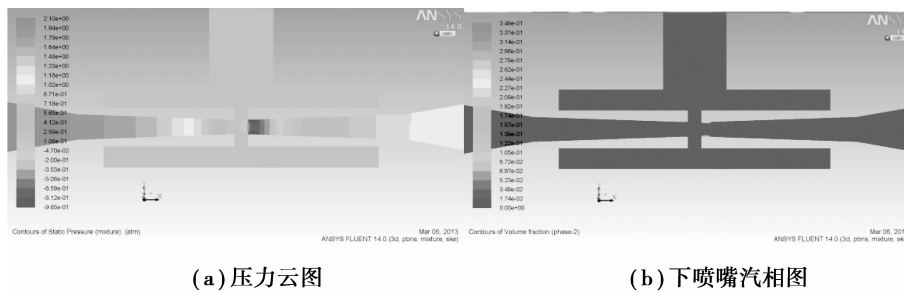


图 10 RFD($d_o/d_i=4.3$)空化现象 ($P_i=0.21 \text{ MPa}, P_o=10 \text{ m}$)

4.2 RFD 极限工作范围

综上所述,为防止 RFD 运行中空化的产生,首

先应提出压力操作的极限参数。未发生空化且效率较高的 RFD 最佳工作范围如表 3 所示。

表 3 空化极限工作范围

RFD 直径比 d_o/d_i	出料管背压/m	压冲压力/ $\times 0.1$ MPa		控制压冲压力上限为最优运行上限的比值/%
		不考虑空化	考虑空化	
3.1	10	2.0~3.0	2.0~2.4	80
	15	2.5~3.5	2.5~3.1	89
	20	3.0~4.8	3.0~3.9	81
4.3	10	2.0~2.5	~2.0	80
	15	2.5~3.2	2.5~2.6	81
	20	2.5~4.0	2.5~3.4	85

对照表 1 中的不考虑空化问题的压力工作范围,可发现考虑空化后,压冲压力的上限将比仅仅考虑流量和效率最优的运行范围下降至 80%~90%,由于 RFD 发生空化的临界点与直径比及出料管背压有关,对于较大直径比(4 左右)和较小出料管背压(扬程为 10 m)的 RFD,压冲压力的这个限制取 80%为宜。将所计算的 4 种喷嘴直径的 RFD 空化发生条件在图 11 汇总。由图 11 可以看出,RFD 的空化极限工作压力与扬程(出料管背压)的比值近似为 2~2.5,扬程较小或 RFD 直径比较小的取大值,即根据 RFD 所需扬程按 2~2.5 倍放大,即可大致估算 RFD 的空化极限工作压力,相对误差约为 $\pm 10\%$ 。

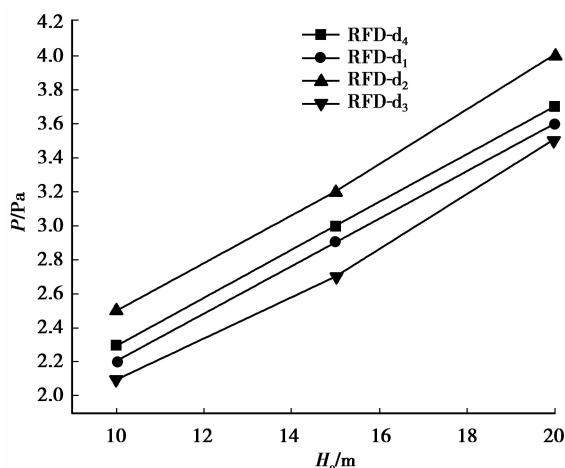


图 11 各 RFD 空化临界工作压力图

5 结 论

分析了 RFD 装置运行中可能出现的空化问题。

对其关键元件进行了压力操作参数的仿真,结合数值仿真分析,对特定 RFD 结构下的压力操作参数进行了讨论。

1) RFD 出流量随工作压力的增加而增加,达到出料管输送极限后出流量不再增加,而 RFD 装置的平均流量、效率由于整个周期(压冲和反吸)的延长而呈先增后减的趋势,同时,随着压冲压力的增大,分流比呈现先增后减的趋势,即低压条件的 RFD 出现分流,压力提升后出现引射,压力再提升,由于进入下喷嘴接收不了过大流量而重新出现分流。由此,得出以流量和效率为优化目标的操作压力范围。

2) RFD 的空化将发生在较高压冲压力时,仿真得出该临界压力与 RFD 的工作扬程(背压)和 RFD 直径比有关,相同条件下,直径比越小、扬程越高越不容易发生空化。

3) 实际操作过程中将压冲压力设置在低于表 1 所示的压冲压力范围的 80%~90% 范围,以防止空化发生。针对 RFD 所需扬程,按工作压力与扬程之比为 2~2.5 倍,确定计算 RFD 压冲压力,可保证不发生空化。

RFD 的结构与射流泵类似,在文献[16]的试验研究中,龙新平认为射流泵即便发生空化,空泡一般也不会管壁上破裂造成汽蚀破坏,因此初步推想 RFD 也同样具有较好的抗汽蚀破坏性能。虽然如此,由于空化出现在操作压力较高的情况下,将导致装置效率显著下降,引起系统振动和噪声,因此仍然需要从操作程序上进行限制,进一步对 RFD 的抗汽蚀性能进行系统试验,通过统计初生空化,获得更通用的空化判别准数表达式。

参考文献:

- [1] Smith G V, Lewis B E. Design of a pulsed-mode fluidic pump using a venture-like reverse flow diverter[R]. Tennessee: OAK Ridge National Laboratory Press, 1987.
- [2] Smith G V, Counce R M. Performance characteristics of axisymmetric venturi-like reverse-flow diverters [J]. Journal of Fluid Control, 1986, 16(4): 19-39.
- [3] Morgan J G, Holland W D. Pulsatile fluidic pump demonstration and predictive model application [R]. Tennessee: OAK Ridge National Laboratory Press, 1986.
- [4] Priestman G H, Tippetts J R. Characteristics of a double-acting fluidic pump with hot and cold water[J]. Journal of Fluid Control, 1986, 16(4): 18-33.
- [5] Robinson S M, Counce R M, Smith G V. Performance characteristics of a continuous-flow fluidic pump[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 1987, 26(8): 1698-1704.
- [6] Crass D W. An evaluation of power fluidicsTM mixing and pumping for application in the singel shell tank retrieval program [C]. formerly Numatec Hanford Corporation, Richaland WA 99353, Mar. 2001.
- [7] Tesar V. Pump for extremely dangerous liquids[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2011, 8(7): 940.
- [8] 李江云, 徐如良, 王乐勤. 可逆流体转换器装置优化设计及应用[J]. 中国机械工程, 2003, 14(23): 57-62.
LI Jiangyun, XU Ruliang, WANG Leqin. Optimization design and the application of RFS system[J]. China Mechanical Engineering, 2003, 14(23): 57-62.
- [9] 郭彦华. 核用气动式脉冲液体射流泵和涡流二极管泵性能实验研究[D]. 北京: 清华大学, 2004.
- [10] 樊燕芳, 徐聪, 景山. 可逆流体转向装置性能的数学模型及参数计算[J]. 原子科学技术, 2009, 43(8): 705-710.
FAN Yanfang, XU Cong, JING Shan. Atomic energyscience and technology, 2009, 43(8): 705-710.
- [11] 李江云, 陈友霖, 王健, 等. RFD 装置优化设计理论及方法研究 [J]. 工程热物理学报, 2010, 31(10): 1675-1679.
LI Jiangyun, CHEN Youlin, WANG Jian, et al. Optimal design theory and methods of RFD set [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2010, 31(10): 1675-1679.
- [12] 李江云, 王健, 胡少华. 基于数值仿真的可逆流体转换器的优化设计方法[J]. 武汉大学学报: 工学版, 2010, 43(6): 747-751.
LI Jiangyun, WANG Jian, HU Shaohua. Based on numerical simulation of reverse flow diverter (RFD) optimized design method [J]. Journal of Wuhan University: Engineering, 2010, 43(6): 747-751.
- [13] Song X H, Park J H, Kim S G, et al. Performance comparison and erosion prediction of jet pumps by using a numerical method [J]. Mathematical and Computer Modeling, 2013, 57(1/2): 245-253.
- [14] Wang G Y, Senocak I, Shyy W, et al. Dynamics of attached turbulent cavitating flows [J]. Progress in Aerospace Sciences, 2001, 37(6): 551-581.
- [15] ANSYS, Inc. ANSYS 14.0 FLUENT Theory Guide [M]. Pennsylvania: Technology Drive Canonsburg, 2011.
- [16] Long X, Yao H, Zhao J. Investigation on mechanism of critical cavitating flow in liquid jet pumps under operating limits [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2009, 52(9/10): 2415-2420.

(编辑 陈移峰)