

文章编号: 2095—0411 (2014) 02 - 0043 - 05

结构参数对拉伐尔喷管空化特性影响的数值模拟^{*}

刘雪东, 刘佳阳, 朱小林, 刘文明

(常州大学 机械工程学院, 江苏 常州 213016)

摘要: 采用 CFD 方法模拟水在不同结构参数拉伐尔喷管中的空化流动情况。在一定的操作参数下, 采用空化泡动力学模型模拟分析拉伐尔喷管不同入口直径、喉部直径、收缩段长度、扩张段长度、扩张段锥角等结构参数对空化效果的影响, 并参照正交试验的方法研究各影响因素与水平之间的关系。结果表明: 随着喷管喉部直径的减小, 空化区域内的汽含率升高, 空化数减小, 空化效应增强; 入口直径与收缩段长度的改变对喷管空化特性的影响不明显; 在一定范围内增大扩张段锥角有利于空化强度的增加, 但锥角过大反而抑制空化的进行; 扩张段长度的增加可以影响空化产生的区域, 但对空化强度影响较小; 正交试验结果表明在几个结构参数之中, 喉部直径的改变对喷管空化特性的影响最大。

关键词: 拉伐尔喷管; 空化效应; 数值模拟; 汽含率

中图分类号: O 351.2

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.2095—0411.2014.02.011

Numerical Simulation on Effect of Cavitation Characteristics with Different Structural Sizes in Laval Nozzle

LIU Xue-dong, LIU Jia-yang, ZHU Xiao-lin, LIU Wen-ming

(School of Mechanical Engineering, Changzhou University, Changzhou 213016, China)

Abstract: CFD method was used to simulate the cavitation of water in Laval nozzle with different structural sizes. In certain operating parameters, the research used Cavitation Bubble Dynamics Model to simulate the cavitation flow with different inlet diameter, throat diameter, contraction length, expansion length and expansion cone angle of Laval nozzle. In order to determine the optimal structure of the nozzle, orthogonal test was made to find out the relationship between factors and levels. The results show that: with throat diameter decrease, the intensity of cavitation is greater in cavitation area. The change of inlet diameter and contraction length has little effect on cavitation. Expansion cone angle has an impact on the cavitation intensity within a certain range. Increase in length of the expansion can affect cavitation area, but has little effect on the cavitation intensity. Orthogonal test shows that the throat diameter has greatest impact on cavitation among several structural sizes.

Key words: Laval nozzle; cavitation effect; numerical simulation; vapor volume fraction

空化是一种复杂的流体动力学现象, 是液体由液相变为汽相的相变过程^[1]。在液流中, 由于压力

突然变化而产生空泡的爆发与溃灭, 使空泡周围产生了瞬间的高温高压并伴随强冲击波和高速微射

^{*} 收稿日期: 2013 - 12 - 31。

基金项目: 江苏省 2013 年度高校研究生科研创新计划资助项目 (CXZZ13_0733)。

作者简介: 刘雪东 (1965—), 男, 江苏滨海人, 教授, 主要从事化工过程机械及粉体工程技术的教学与研究。

流, 这样的极端条件能够强化许多物理、化学工艺过程^[2-3]。空化按产生方式可分为超声空化、水力空化、光空化、粒子空化等, 其中水力空化由于设备简单、能量利用率高、易实现工业化操作等特点, 近年来已成为空化对过程强化研究的热点^[4]。

在液态介质中, 用机械方法激发空泡过程的方法很多, Neveddev^[5-6]等学者利用拉伐尔喷管产生空泡处理液态介质的方法对石油进行加工, 验证其达到了一定的降粘与馏分分离的效果。由于喷管结构对空化产生的区域及强度有一定影响, 因此本文对不同结构参数拉伐尔喷管内的空化流场进行数值模拟, 分析结构参数对空化效果的影响规律, 并参照正交试验的方法, 模拟喷管主要因素对空化效果的影响, 从而为喷管结构的优化设计提供指导。

1 计算模型与方法

1.1 研究对象

拉伐尔喷管作为文丘里管的一种特殊形式, 常被用于超声气流加速, 而由于其管径急剧变化的特点, 在水力空化的应用中也有较好的效果。当液态介质通过拉伐尔喷管时, 会在其低压区形成空化泡, 空泡溃灭产生的冲击波即能够作用于该液态介质。本文的计算模型采用拉伐尔喷管的结构形式, 收缩段按维托辛斯基曲线设计, 见式 (1), 扩张段按锥形管设计, 锥角 θ 在 $8^\circ \sim 12^\circ$ 范围内为宜^[7]。其主要结构参数包括入口直径 D_1 、喉部直径 d 、收缩段管长 L_1 、扩张段管长 L_2 、扩张段锥角 θ 等, 喷管喉部中心处为坐标原点, 如图 1 所示。

$$\frac{D}{2} = \frac{d/2}{\sqrt{1 - \frac{1 - (d/D_1)^2 (1 - \delta^2/L_1^2)^2}{[1 + \delta^2 / (\sqrt{3} L_1)^2]^3}}} \quad (1)$$

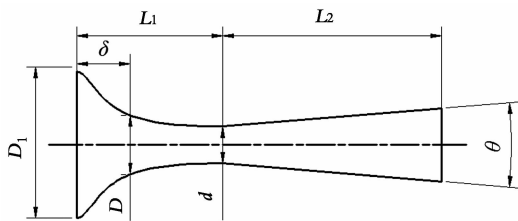


图 1 拉伐尔喷管结构参数图

Fig. 1 Structural sizes of Laval nozzle

由于拉伐尔喷管具有轴对称性, 因此在实际模拟中选取截面的一半作为研究对象, 从而简化计算过程。为了分析比较喷管各结构参数对空化效果的影响, 本文采用控制变量的方法, 在改变其中一个

结构参数的同时保持其他因素不变, 各因素的初始定量值为 $D_1 = 20\text{mm}$ 、 $d = 5\text{mm}$ 、 $L_1 = 20\text{mm}$ 、 $L_2 = 30\text{mm}$ 、 $\theta = 10^\circ$ 。

1.2 模拟方法

采用 CFD 软件 Fluent 6.3.26 模拟拉伐尔喷管内空化流场流动情况。首先利用前处理软件 Gambit 进行几何建模与网格划分, 由于模型结构比较简单, 网格划分采用了精度较高的结构化网格, 在喷管喉部处进行局部加密处理, 模拟采用标准 $k-\epsilon$ 湍流模型和 Mixture 混合模型, 不考虑相间滑移速度, 压力速度耦合方式选择 SIMPLE, 以非稳态的计算方式得到流场情况。边界条件设置为入口压力 1.2MPa , 出口压力 0.1MPa , 温度 20°C , 模拟介质为水。

在模拟空化流场时, 采用多相流设置中 Cavitation 功能模块。该模块只涉及两相系统, 假设单位体积内的气泡数量是预先知道的, 当流体中的压力低于流体在该温度下的饱和蒸汽压, 溶于液体中的气体会分离出来产生气泡。

单个气泡体积关于空间和时间的变化为:

$$\phi(\bar{r}, t) = \frac{4}{3}\pi R^3 \quad (2)$$

式中: R —气泡的半径。

蒸发的汽含率定义为:

$$\alpha_v = \frac{\phi\eta}{1 + \phi\eta} \quad (3)$$

式中: η —单位流体容积内的气泡数量。

1.3 空化数

空化数 C_v 是用来表示空化状态的一个无量纲数, 其表达式为:

$$C_v = \frac{p - p_v}{1/2\rho v_0^2} \quad (4)$$

式中: p —流体绝对压力 (Pa), p_v —该温度下饱和蒸汽压 (Pa), ρ —流体密度 (kg/m^3), v_0 —流体流速 (m/s)。

从式 (4) 中可以看出影响空化数的两个变量分别为 p 与 v_0 , 空化数与 p 和对应条件下 p_v 的差值成正比, 与 v_0 的平方成反比。在空化发生的初始阶段, 空化数很大, 随着空化的发展, 空化数逐渐减小^[8], 因此可以用空化数表征流场中是否出现空化和空化的程度。

2 模拟结果与分析

喷管中气相组分的汽含率 α_v 与空化数 C_v 可以用来表征空化强度的大小, 汽含率越高, 空化数越小, 即说明空化强度越大。空化一般发生在喉部出口至向外扩张的管段内, 该区域称为空化区, 因此本文以喉部中心为坐标原点, 沿流体流动的轴线方向为 x 轴正方向, 在喷管扩张段沿轴线方向取若干横截面, 分别计算各截面的平均汽含率与空化数, 比较其数值大小与变化趋势, 以此评定喷管的空化特性。

2.1 喉部直径的影响

d 是影响喷管空化效果的重要参数之一, 分别对 d 为 4、5、6、7mm 的拉伐尔喷管进行空化流场模拟, 其余喷管结构参数按初始值设置为: $D_1=20\text{mm}$ 、 $L_1=20\text{mm}$ 、 $L_2=30\text{mm}$ 、 $\theta=10^\circ$, 并计算扩张段沿轴线方向各截面的平均汽含率 α_v , 比较其变化趋势, 如图 2 所示。

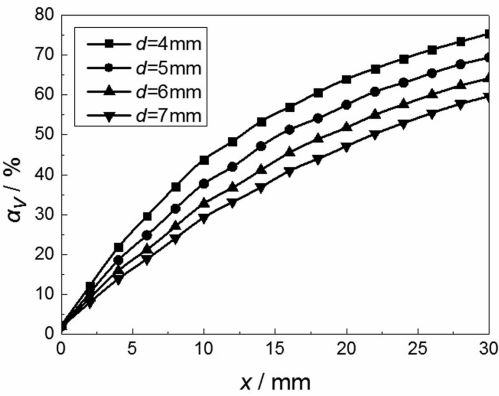


图 2 不同喉部直径喷管在扩张段轴线方向平均汽含率分布图
Fig. 2 Average vapor volume fraction in axial direction of nozzles with different throat diameter

由图 2 可以看出, 流体通过喷管喉部后, 空化区域内的汽含率从 0 迅速上升, 但其增长趋势逐渐减缓, 说明在靠近喷管喉部出口的空化区域内, 由于压力突然降至液体在该温度下的饱和蒸汽压而汽化形成大量空化泡, 因此空化效应最为强烈, 之后汽含率趋于稳定, 空化效应逐渐减弱。

通过对比图中不同喉部直径喷管在其扩张段汽含率的变化, 可知随着 d 的减小, 空化区内的汽含率增加, 压力减小, 因此空化强度也加强。这是因为在相同的入口操作条件下, 流体在 d 较小的喷管中加速更快, 空化数的减小表明喷管内的空化效应更加强烈, 如图 3 所示。 d 为 4mm 的喷管空

化数最小, 即说明 d 越小越有利于空化的产生, 而且空化强度越大, 这也与之前得出的结论一致。

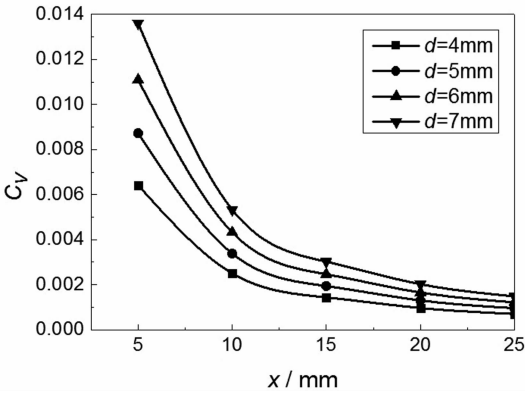


图 3 不同喉部直径喷管扩张段轴线上各点空化数分布图
Fig. 3 Cavitation number in axial direction of nozzles with different throat diameter

由于 d 的缩小限制了通过喷管的流体流量, 因此从实际生产的方面考虑, d 并不会无限制的减小。而通过模拟发现, 虽然随着 d 的减小, 空化程度越强, 但空化所产生的气泡体积总量较少, 所以 d 的选择应视实际生产需要而定。单从空化特性而言, 喉部直径越小, 喷管空化强度越大。

2.2 入口直径与收缩段长度的影响

由于 D_1 与 L_1 决定了喷管收缩段的曲线线型, 从而影响流体进入喷管的流动特性, 所以综合考虑这两方面因素, 分别对喷管 D_1 为 10、15、20、25mm, L_1 为 15、20、25、30mm 的拉伐尔喷管进行空化流场模拟, 改变某一结构参数时, 其余参数按初始值设定。喷管空化区内平均空化数见表 1。

表 1 不同入口直径与收缩段长度喷管在空化区内平均空化数
Table 1 Average cavitation number in cavitation area of nozzles with different inlet diameter and contraction length

结构参数	D_1/mm				L_1/mm			
	10	15	20	25	15	20	25	30
$C_v \times 10^{-3}$	4.47	4.63	4.69	4.69	4.71	4.69	4.62	4.60

从表 1 中可以看出, 不同结构参数的喷管空化区内平均空化数数值十分接近, 其变化不超过 3%, 这表明任意改变 D_1 或 L_1 中的一个结构参数, 喷管的空化效果变化并不十分不明显。其原因在于设计拉伐尔喷管收缩段的维托辛斯基曲线会根据这两个参数的变化而调整曲线线型而保证流体以平稳的方式通过喷管, 因此流体通过喷管喉部后也有着相似的流动特性。从变化趋势上看, 空化数随

着 D_1 的增加而增大, 随着 L_1 的增加而减小, 所以喷管强度随着 D_1 越小, L_1 越大, 空化强度越大。

2.3 扩张段锥角的影响

拉伐尔喷管的 θ 值决定空化区域的大小, 因此分别对 θ 为 8° 、 10° 、 12° 、 15° 、 20° 的拉伐尔喷管进行空化流场模拟, 其余结构参数不变, 轴向平均汽含率如图 4 所示。从图中可以看出, 随着 θ 的增大, 喷管空化区域内的汽含率有较为明显的增加, 这是因为流体通过喉部时在扩张段壁面会产生一个低压区, 空化效应在低压区内得到强化, 因此 θ 的增加也使得低压区的范围扩大, 这样更有利于空化的产生, 空化强度也随之增强。

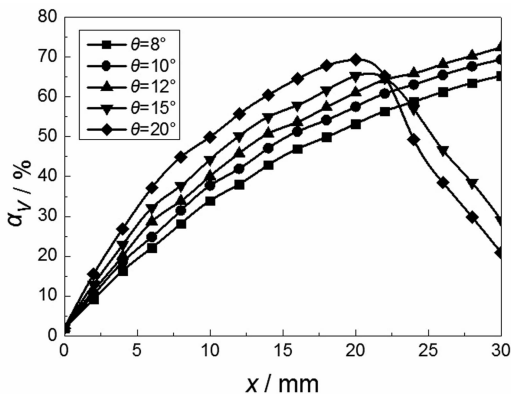


图 4 不同扩张段锥角喷管在扩张段轴线方向平均汽含率分布图

Fig. 4 Average vapor volume fraction in axial direction of nozzles with different expansion cone angle

但在模拟中发现, 当 θ 增大到 15° 时, 空化区的汽含率出现了下降趋势。这是因为流体在通过喉部后流动空间突然加大, 流体相对速度减小, 阻碍了空化泡的生成。当锥角过大时, 流体无法立刻充满喷管, 同时湍流程度的增加也不利于空泡的保存与发展, 所以空化强度并不是随着 θ 增大而无限增强。就本课题而言, 为满足拉伐尔喷管的结构需求, 喷管扩张段锥角 θ 为 12° 时更有利于空化的发展。

2.4 扩张段长度的影响

L_2 是影响空化特性的因素之一, 分别对 L_2 为 30、45、60mm 的拉伐尔喷管进行空化流场模拟, 其余喷管结构参数按初始值设置为: $d=5\text{mm}$ 、 $D_1=20\text{mm}$ 、 $L_1=20\text{mm}$ 、 $\theta=10^\circ$, 轴向各横截面的平均汽含率如图 5 所示。由于各喷管在 $0\sim30\text{mm}$ 这一管段的结构参数完全相同, 流体在喷管中有着

相同的流动特性, 因此该空化区域内的汽含率并没有太大差异, 空化效果相似。而随着喷管扩张段的延伸, 汽含率不断上升, 空化效应仍继续加强。但在 L_2 为 48mm 处时, 汽含率出现了下降趋势, 说明空化不再继续发生, 空化泡的溃灭导致了汽含率的下降。在图 6 (c) 中可以更直观地看出空化的变化情况, 空化强度之所以在靠近出口处减弱, 是因为随着扩张段的延伸, 下游恢复压力的变大导致了管内压力迅速恢复, 空泡随着流体进入压力恢复区从而受到挤压而溃灭, 因此在靠近喷管出口处汽含率下降, 空化强度减弱。增加 L_2 可以使空化区域增加, 有利于空泡的发生与发展, 但当喷管内压力受出口压力影响变大时, 空泡溃灭, 空化不再继续, 此时继续增加喷管长度反而不利于空化的进行。

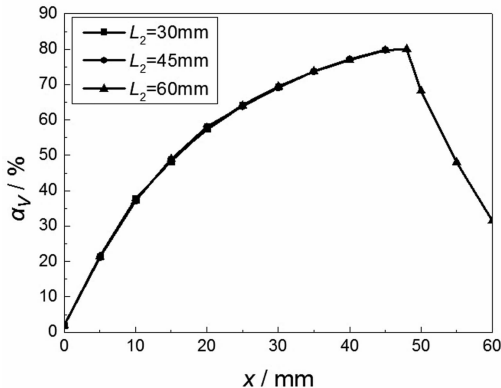


图 5 不同扩张段长度喷管在扩张段轴线方向平均汽含率分布图

Fig. 5 Average vapor volume fraction in axial direction of nozzles with different expansion length

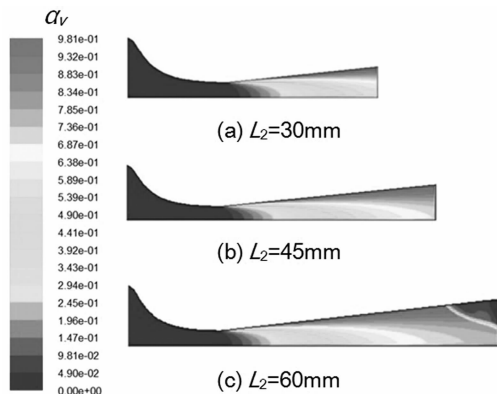


图 6 不同扩张段长度喷管汽含率云图

Fig. 6 Contours of vapor volume fraction in nozzles with different expansion length

3 正交试验模拟

为了更好的探究喷管结构参数对空化特性的影响, 从而得到较为优化的喷管结构, 本研究参照正

交试验的方法, 结合前述研究结果, 选定喷管 d 、 L_1 、 θ 为影响空化的主要因素, 每个因素选取 3 个水平, 见表 2, 结构参数 D_1 为 20mm、 L_2 为 30mm。以空化区内 $x=10\text{mm}$ 处的截面平均汽含率为试验指标, 进行正交试验条件模拟, 结果见表 3。

表 2 拉伐尔喷管结构因素及其水平表

Table 2 Structural factors and levels of Laval nozzle

因素	A	B	C
	d/mm	L_1/mm	$\theta/ (^{\circ})$
1	4	20	8
2	5	25	10
3	6	30	12

表 3 正交试验结果分析表

Table 3 Analysis of orthogonal test results

试验号	1	2	3	α_v
1	1	1	1	0.397
2	1	2	2	0.429
3	1	3	3	0.468
4	2	1	2	0.382
5	2	2	3	0.415
6	2	3	1	0.357
7	3	1	3	0.369
8	3	2	1	0.328
9	3	3	2	0.351
κ_1	0.431	0.383	0.361	
κ_2	0.385	0.391	0.387	
κ_3	0.349	0.392	0.417	
极差	0.082	0.009	0.056	

由表 3 可以看出, 对于汽含率这项指标, 各因素极差从大到小的排列次序为 A、C、B, 说明这 3 个因素中 d 对喷管空化的影响最大, θ 次之, 而 L_1 的影响最小。正交试验所得出的最优方案为 $A_1C_3B_3$, 与 3 号试验刚好一致, 因此由正交试验模拟得出 $d=4\text{mm}$, $L_1=30\text{mm}$, $\theta=12^{\circ}$ 为最优方案。

4 结 论

(1) 改变拉伐尔喷管各结构参数对喷管内空化

流场均有不同程度的影响。减小 d 或在一定范围内增大 θ , 喷管内的空化强度都能得到明显加强; L_2 的增加能使空化区域范围扩大, 空化产生的气泡数增多, 直至压力恢复而使空泡溃灭; 改变 D_1 、 L_1 中任一结构参数, 空化效果的变化程度较小。

(2) 通过正交试验的方法, 确定 d 是影响喷管空化效果的最主要因素, θ 对空化的影响略小, 因此在喷管的实际加工中应首先考虑喷管喉部直径 d 的影响。

(3) 通过数值模拟以及正交试验模拟, 在一定的结构参数范围内认定拉伐尔喷管的最优化结构参数为: $D_1=20\text{mm}$, $d=4\text{mm}$, $L_1=30\text{mm}$, $L_2=60\text{mm}$, $\theta=12^{\circ}$ 。

参考文献:

[1] 黄继汤. 空化与空蚀的原理及应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1991: 11 - 12.

[2] Dular M, Stoffel B, Sirok B. Development of a cavitation erosion model [J]. Wear, 2006, 261 (5 - 6): 642 - 655.

[3] Kumar P, Kumar M, Pandit A. Experimental quantification of chemical effects of hydrodynamic cavitation [J]. Chemical Engineering Science, 2000, 55 (1): 1633 - 1639.

[4] 袁丹青, 陈向阳, 白滨, 等. 水力机械空化空蚀问题的研究进展 [J]. 排灌机械, 2009, 27 (4): 269 - 272.

[5] Nevedev A V, Cherkas V D, Zhukov A D, et al. Liquid medium treatment method: US, 20100230367A1 [P]. 2010 - 09 - 16.

[6] Nevedev A V, Danilov - Daniljan A V. Liquid medium supply method: US, 20100313961A1 [P]. 2010 - 12 - 06.

[7] 曹学文, 陈丽, 林宗虎, 等. 用于超声速旋流分离器中的超声速喷管研究 [J]. 天然气工业, 2007, 27 (7): 112 - 114.

[8] 王智勇. 基于 FLUENT 软件的水力空化数值模拟 [D]. 大连: 大连理工大学, 2006.