排灌机械工程学报
Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering
2018 年 1 月 Jan. 2018 | 第 36 卷 第 1 期 Vol. 36 No. 1

doi:10.3969/j.issn.1674-8530.17.0152

文丘里施肥器空化特性数值模拟

程千*，黄修桥，李浩，韩启彪
（中国农业科学院农田灌溉研究所/河南省节水农业重点实验室，河南 新乡 453002）


程千

摘要：采用数值模拟的方法对结构优化后的文丘里施肥器进行空化特性研究，探讨了空化影响施肥器性能的原因，揭示了施肥器内部流动耗能机理. 研究结果表明：随着施肥器进出口压差不断增大，吸肥口负压值不断降低，吸肥流量不断增大，当吸肥口负压降低到最低值时，吸肥口负压值保持不变，吸肥流量将保持恒定，此后随着施肥器进出口压差不断增大，首先在喉部与扩散段连接处产生空化，并沿扩散段壁面向下游不断扩大增厚. 通过比较不同压差条件下，施肥器不同截面的能量特征发现，未发生空化时，随着压差增大，喉部能量损失也增大，占施肥器总损失的 1/2 左右；空化发生时，随着压差增大，喉部能量损失保持不变，而扩散段能量损失不断增大，这是由于空化的发展使扩散段流态恶化，空化区域外部及尾部产生大范围的涡，消耗较多能量，大量的无效能量损失使得施肥器吸肥效率急剧下降.

关键词：文丘里施肥器；空化；数值模拟；吸肥性能
中图分类号：S224.21 **文献标志码**：A **文章编号**：1674-8530(2018)01-0088-05

程千，黄修桥，李浩，等. 文丘里施肥器空化特性数值模拟[J]. 排灌机械工程学报,2018,36(1):88-92.

CHENG Qian, HUANG Xiuqiao, LI Hao, et al. Numerical simulation of cavitation characteristics of Venturi injector[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering(JDIME), 2018,36(1):88-92. (in Chinese)

Numerical simulation of cavitation characteristics of Venturi injector

CHENG Qian, *HUANG Xiuqiao*, *LI Hao*, *HAN Qibiao*
(Farmland Irrigation Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Water-saving Agriculture of Henan Province, Xinxiang, Henan 453002, China)

Abstract: The cavitation characteristics of one post-optimized Venturi injector were investigated by numerical simulation, in order to explore declination in the injection performance caused by cavitation and to reveal the mechanism of energy loss in the flow field of Venturi injector. Results show that when the pressure difference across the Venturi increases, the suction pressure decreases continuously and the suction flow rate rises. Once the suction pressure decreases to the minimum, the suction pressure will keep constant, so does the suction flow rate. If the pressure difference is further increased, cavitation firstly occurs in the junction between the throat and the diffuser, and then expands downstream gradually along the diffuser wall. By contrasting the total hydraulic heads at various cross-sections along the Venturi injector axis under different pressure conditions, the energy loss at the throat increases with increasing pressure difference, but it is about half the total energy. Once the cavitation occurs, the energy loss at the throat will keep constant, while the energy loss across the diffuser will be enlarged. This is because cavitation development can deteriorate the flow condition in the diffuser and

收稿日期：2017-07-05；**修回日期**：2017-09-08；**网络出版时间**：2017-12-26
网络出版地址：http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20171226.1557.026.html
基金项目：国家重点研发计划项目(2016YFC0400104)；中央级科研院所基本业务费专项(中国农业科学院农田灌溉研究所)
第一作者简介：程千(1987—)，男，河南郑州人，助理研究员，博士(通信作者，qiangood526@126.com)，主要从事节水灌溉技术与装备研究.
第二作者简介：黄修桥(1961—)，男，湖北汉川人，研究员，博士生导师(huangxq626@126.com)，主要从事节水灌溉理论与技术和水资源高效利用研究.

produce large-scale vortices around the cavities, which consume even more energy. The increased energy consumption results in a sudden and rapid decrease in the injection efficiency.

Key words: Venturi injector; cavitation; numerical simulation; injection performance

水肥一体化技术具有省水节肥、节约劳力、增产保质、生态环保等诸多优点，已成为农业科技的重要研究内容之一. 施肥装置是水肥一体化系统的基本设备之一，其性能好坏直接影响到整个灌溉施肥系统的质量. 目前国内外喷、微灌系统中常用的施肥装置有压差式施肥罐、文丘里施肥器及注肥泵等，其中文丘里施肥器因其结构简单、操作简便，不需外动力等优点，在微灌系统中得到了广泛的应用[1].

国内有关文丘里施肥器的研究成果可以追溯到 1992 年，封俊等[2]首先开展了滴灌系统文丘里施肥器的水力性能研究. 金永奎等[3]进行了文丘里施肥器系列研制，弥补了当时国内施肥器品种少、规格单一的不足，能够满足大中小型微灌系统的使用. 然而，文丘里施肥器在使用过程中仍然存在较大水力损失，其占系统总水头的 10% ~30%，并且吸肥效率较低，通常低于 15%[4]，造成了较大的能量浪费.

为了提高文丘里施肥器的吸肥性能，王淼等[5]、孙艳琦等[6]、严海军等[7]分别采用 CFD 和试验方法分析了施肥器主要结构参数与吸肥性能之间的关系，并进行了优化设计. 范兴科等[8]采用试验方法分析了文丘里施肥器内部流动的能量转化过程，指出随着压差增大，喉部压能降至最低而动能大幅增加，产生的水头损失也急剧增大. XU 等[9-10]采用试验方法对文丘里施肥器内部产生的空化现象进行了研究，提出了识别空化发生的新方法，捕捉了空化发展的形态变化过程. 空化试验结果显示了空化的产生对吸肥性能的影响，但空化如何造成施肥器吸肥性能下降以及空化与内部流动损失的关系尚不明确，需进一步研究.

文中采用数值模拟方法研究文丘里施肥器内部空化过程，深入分析施肥器吸肥量及吸肥效率随进出口压差变化的规律，探究制约吸肥量增加的因素；通过比较不同压差条件下，施肥器不同截面的能量特征以及施肥器内部空化发展过程，揭示文丘里施肥器内部流动耗能机理，为文丘里施肥器的优化设计提供建议.

1　计算模型与设置

1.1　计算模型

计算模型为 DN25 组合式文丘里施肥器，内部结构如图 1 所示.

结构参数参考文献[7]优化后的尺寸，具体为进、出口管段直径 d_1，d_2 分别为 15.6，22.0 mm；进、出口管段长度 $L_3 = L_4 = 20$ mm；收缩段、扩散段的最小直径 d_{t1}，d_{t2} 分别为 4.0，5.2 mm；收缩段、扩散段的角度 α，β 分别为 13°，6°；收缩段 I、扩散段 I 的长度 L_1，L_2 分别为 15，20 mm；喉部直径（即扩散段最小直径）d_{t2} 为 5.2 mm，喉部长度 L_t 为 4 mm，吸肥口直径 d_3 为 4.0 mm.

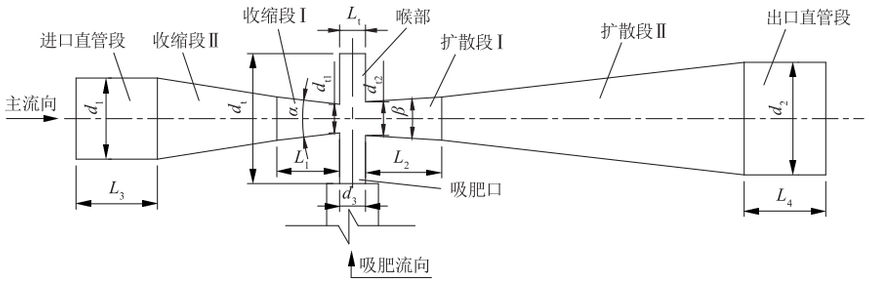
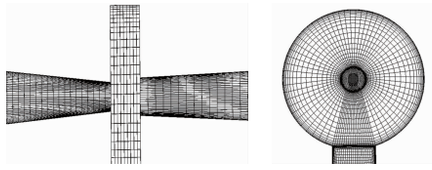


图 1　DN25 文丘里施肥器内部结构

Fig. 1　Internal structure of DN25 Venturi injector

采用 Pro/E 软件建立文丘里施肥器的三维模型，沿主流方向为 x 轴方向，沿吸肥流向为 y 轴方向，z 轴方向符合右手螺旋定则. 将模型导入 ICEM 软件进行网格划分，整个计算域均采用结构化六面体网格，沿主流方向的流道采用“O”型拓扑结构，以更好地适应圆形截面的流道. 经过网格独立性验证，最终整个计算域的网格单元数为 267 490，网格质量大于 0.5. 计算网格如图 2 所示.



(a) z=0流道截面 (b) x=0流道截面

图2 计算网格

Fig. 2 Computational mesh

1.2 计算方法

基于黏性不可压缩雷诺时均 Navier－Stokes 方程和标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型,结合 Mixture 均质两相流模型和 Z－G－B 空化模型[11],采用 Ansys Fluent 14.5 软件对文丘里施肥器内部空化流动进行计算. 进口、出口和吸肥管入口均采用压力边界,根据文献[7]的试验结果,进口压力为 0.45 MPa 时,临界吸肥压力约为 0.17 MPa. 因此文中采用进口压力保持 0.45 MPa 不变,出口压力由 0.30 MPa 均匀减小至 0,吸肥管入口压力为 0,各压力值均为相对于标准大气压的相对压力值,管壁为光滑壁面,且为无滑移边界条件. 采用有限体积法进行控制方程离散,压力速度耦合求解采用 SIMPLEC 算法. 收敛精度为 10^{-5}.

1.3 可靠性验证

反映文丘里施肥器工作性能的参数有吸肥流量 q 和吸肥效率 η. 吸肥效率计算公式为

$$\eta = MN = \frac{q}{Q_1}\frac{p_2 - p_3}{p_1 - p_2}, \tag{1}$$

式中:M 为流量比;N 为水头比;Q_1 为进口流量,L/h;p_1为进口总水头,m;p_2为出口水头,m;p_3为吸肥口总水头,m.

M 反映了施肥器吸肥能力的大小;N 反映了施肥器水头损失大小;η 反映了文丘里施肥器的综合吸肥性能.

效率计算结果如图 3 所示. 计算得到最高效率为 12.6%,与文献[7]中的结果相近,并且效率变化规律与文献[4]一致,说明文中采用的计算方法是可靠的.

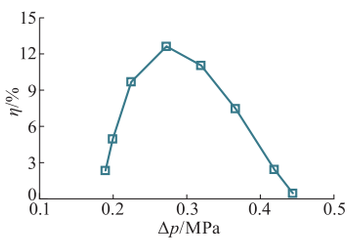


图3 吸肥效率与进出口压差的关系

Fig. 3 Relationship between injection efficiency and pressure difference

2 结果与分析

2.1 吸肥性能

图 4 为文丘里施肥器吸肥流量与进出口压差关系曲线图. 由图可知,随着进出口压差逐渐增加,吸肥流量首先线性增加,然后保持不变,曲线的拐点说明存在极限吸肥流量.

根据文丘里原理,肥液被吸入管路的动力来自高速水流流经喉管处产生的负压,吸肥口负压值 p_s 随施肥器进出口压差关系如图 5 所示,可以看出,随着进出口压差逐渐增加,吸肥口负压值逐渐减小,吸肥流量不断增加;当压差达到一定值时,吸肥口负压值保持不变,吸肥量也达到极限吸肥流量.

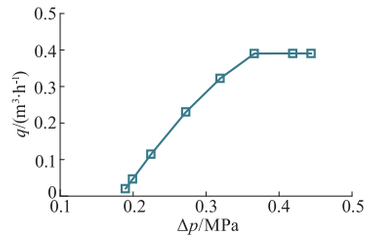


图4 吸肥流量与进出口压差的关系

Fig. 4 Relationship between suction flow rate and pressure difference

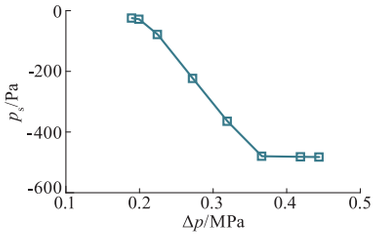


图5 吸肥口负压值与进出口压差的关系

Fig. 5 Relationship between negative suction pressure and pressure difference

由文丘里施肥器吸肥效率与进出口压差关系曲线图 3 可知,随着进出口压差逐渐增大,吸肥效率先增大后减小.

对比图 3 和 5 可以看出,在到达极限吸肥量之前,施肥器吸肥效率已经下降. 结合两图和公式(1)可知,当效率出现下降时,虽然流量比仍增大,但增大幅度已减小,而此时扬程比大幅下降,说明当吸肥效率不断下降时,用于吸肥的有效能量的比重在减小,而能量损耗的比重在增大. 这是由于文丘里施肥器内部流态不断恶化,出现分离流、空化等不稳定流动,能量损失不断增大所致.

2.2　能量特性

为了分析文丘里施肥器内部流动的能量损失情况，沿主流方向（x 轴）取不同截面，比较各截面总水头值，如图 6 所示，图中 x/L 为各截面与进口截面的量纲一的距离，ΔH 为各截面与进口截面的水头差；图中不同曲线代表施肥器进出口压差不同. 由图可知，在进口直管段和收缩段，不同截面的总水头基本保持不变，这是因为壁面考虑为光滑壁面，不计入摩擦阻力损失. 随着压差增大，各截面的总水头保持不变，说明吸肥口上游段流态较好，消耗能量较少. 在喉部，喉部进、出口水头差占施肥器总水头差的 1/2 左右，并且随着压差增大，喉部进、出口的水头差不断增大，而当压差增大至 0.32 MPa 后，压差继续增大并不能使喉部进、出口的水头差继续增大，说明随着施肥器进出口压差不断增大，喉部处获得的能量先不断增加，然后保持恒定，这与吸肥口负压值和吸肥量的变化规律一致. 在扩散段和出口直管段，随着压差增大，能量损失不断增大，主要集中在扩散段 I 以及扩散段 II 的前部，这主要是由内部流态恶化及空化的发生所致. 当压差增大为 0.45 MPa 时，扩散段 I 处的能量损失增量减少，这是因为该区域空化不断发展，导致水力损失较少[12].

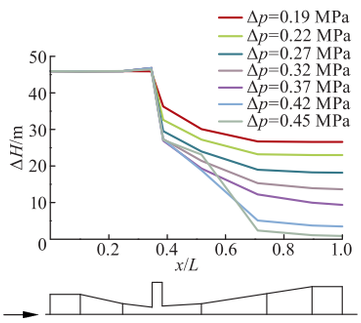


图 6　不同压差下文丘里施肥器各截面水头变化规律

Fig. 6　Total hydraulic heads at various cross-sections in Venturi under different pressure conditions

2.3　空化特性

图 7 为不同空化程度下文丘里施肥器内部流场情况，取 $z=0$ 的 $x-y$ 截面，图 7a—d 的（i）为气泡体积分数 φ 分布图，图 7a—d 的（ii）为涡分布图. 涡采用 λ_2 准则判断，λ_2 为对称张量 $\boldsymbol{G}$ 的第 2 个实特征值（$\lambda_1 \geqslant \lambda_2 \geqslant \lambda_3$），$\lambda_2 < 0$ 表示涡诱导的断面内压力有极小值，可用于确定涡轴的位置.

为了更好地表示涡的形态，取 $\lambda_2 = -10^5\ \mathrm{s}^{-2}$. $\boldsymbol{G}$ 的计算公式为

$$\boldsymbol{G} = \boldsymbol{\Omega}_{ij}^2 + \boldsymbol{e}_{ij}^2, \tag{2}$$

式中：$\boldsymbol{\Omega}$ 为涡量张量；$\boldsymbol{e}$ 为应变速率张量；i，j 为维数，取 1，2，3.

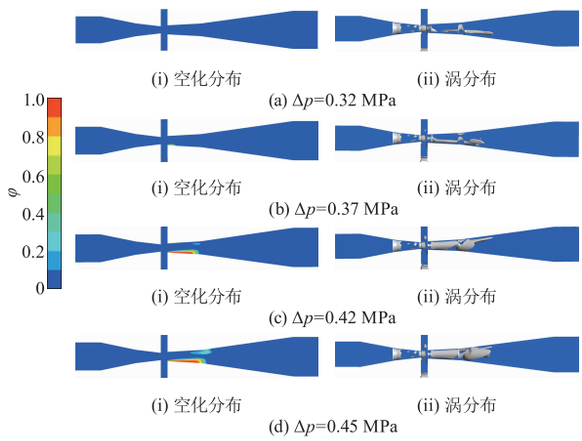


图 7　不同压差下空化及涡分布图

Fig. 7　Cavitation and vortices distributions under different pressure conditions

结合图 3—6 分析，图 7ai 中空化尚未发生，吸肥口负压继续减小，吸肥量增大，但吸肥效率已开始下降. 图 7aii 中显示除了收缩段、喉部和扩散段等连接位置因壁面结构变化引起的涡之外，在扩散段 I 以及扩散段 II 前部主流中也出现了涡，造成能量损失，这与图 6 中当压差增大至 0.32 MPa 时，扩散段 II 的水头差出现增大的现象是对应的，说明该压差下，施肥器扩散段内部流态出现紊乱，形成涡，增加了水力损失，导致吸肥效率降低. 图 7bi 中空化开始发生，首先发生在喉部与扩散段连接的位置，此时吸肥口负压降至最低，吸肥量达到最大吸肥量，说明空化发生制约了施肥器的吸肥能力. 图 7ci，di 显示随着压差不断增大，空化区域沿扩散段壁面不断扩大，并且增厚，向流道中心扩展. 由于施肥器结构不对称，空化区域沿周向的增长速度不一致，呈现不对称的形态. 图 7bii，cii，dii 显示在空化区域附近，涡形态较大，说明空化的产生使主流流态进一步恶化，在空化区域周围及尾部产生大面积的涡，造成较大能量损失，特别是在空化区域尾部，会形成回射流，造成空化脱落，使流动更加不稳定，这与图 6 中压差增大至 0.42 和 0.45 MPa 时，截面 6 和 7 之间的水头差出现大幅增加的现象也是对应的.

3　结　论

1）随着文丘里施肥器进出口压差不断增大，吸肥口负压值先降低、后保持不变，吸肥流量增加至

恒定,多余的能量被不稳定流动消耗,施肥器吸肥效率大幅下降.

2)随着文丘里施肥器进出口压差不断增大,空化首先发生在喉部与扩散段连接处,然后沿扩散段壁面不断扩大,并且增厚,向流道中心扩展.

3)空化产生及发展,使扩散段流态不断恶化,导致空化区域外部及尾部产生大范围的涡,消耗较多能量,流动损失大幅增加,造成施肥器吸肥效率急剧下降.

参考文献(References)

[1] 韩启彪, 黄兴法, 刘洪禄,等. 6种文丘里施肥器吸肥性能比较分析[J]. 农业机械学报, 2013,44(4):113-117,136.
HAN Qibiao, HUANG Xingfa, LIU Honglu, et al. Comparative analysis on fertilization performance of six Venturi injectors[J]. Transactions of the CSAM, 2013,44(4):113-117,136. (in Chinese)

[2] 封俊, 沈雪民, 刘春和,等. 文丘里滴灌施肥器水力性能的研究[J]. 节水灌溉, 1992(1):41-43.
FENG Jun, SHEN Xuemin, LIU Chunhe, et al. Research on the hydraulic performance of Venturi injector in drip irrigation[J]. Water saving irrigation, 1992(1):41-43. (in Chinese)

[3] 金永奎, 夏春华, 方部玲. 文丘里施肥器系列的研制[J]. 中国农村水利水电, 2006(5):14-16,20.
JIN Yongkui, XIA Chunhua, FANG Buling. Research and development of Venturi fertilizer applicator series[J]. China rural water and hydropower, 2006(5):14-16,20. (in Chinese)

[4] LIMA NETO I E, De MELO PORTO R. Performance of low-cost ejectors[J]. Journal of irrigation & drainage engineering, 2004,130(2):122-128.

[5] 王淼, 黄兴法, 李光永. 文丘里施肥器性能数值模拟研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(7):27-31.
WANG Miao, HUANG Xingfa, LI Guangyong. Numerical simulation of characteristics of Venturi injector[J]. Transactions of the CSAE, 2006,22(7):27-31. (in Chinese)

[6] 孙艳琦, 牛文全. 文丘里管结构参数对其水力性能的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2010,38(2):211-218.
SUN Yanqi, NIU Wenquan. Effects of Venturi structural parameters on the hydraulic performance[J]. Journal of Northwest A&F University (nat sci ed), 2010,38(2):211-218. (in Chinese)

[7] 严海军, 陈燕, 初晓一,等. 文丘里施肥器结构参数优化对吸肥性能的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2013, 31(2):162-166,179.
YAN Haijun, CHEN Yan, CHU Xiaoyi, et al. Influence of optimization of structural parameters on injection performance of Venture injector[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering, 2013,31(2):162-166,179. (in Chinese)

[8] 范兴科, 孔令阳. 文丘里施肥器能量转化关系[J]. 排灌机械工程学报, 2013,31(6):528-533.
FAN Xingke, KONG Lingyang. Relationship of energy conversion for Venturi injector[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering, 2013,31(6):528-533. (in Chinese)

[9] XU Yuncheng, CHEN Yan, HE Jianqiang, et al. Detection of cavitation in a Venturi injector with a combined method of strain gauges and numerical simulation[J]. Journal of fluids engineering, 2014, 136(8):081302.

[10] XU Yuncheng, CHEN Yan, WANG Zijun, et al. Investigation of the cavitation fluctuation characteristics in a Venturi injector[J]. Fluid dynamics research, 2015,47(2):25506.

[11] FENG Weimin, CHENG Qian, GUO Zhiwei, et al. Simulation of cavitation performance of an axial flow pump with inlet guide vanes[J]. Advances in mechanical engineering, 2016,8(6):1-8.

[12] 曹国凭, 张耀宗, 陈举烽. 气、液两相流在水平管道中水头损失的实验研究[J]. 河北理工学院学报, 2006,28(3):118-120,125.
CAO Guoping, ZHANG Yaozong, CHEN Jufeng. The Experimental research on head loss of two phase gas-liquid flow in the level line[J]. Journal of Hebei Institute of Technology, 2006,28(3):118-120,125. (in Chinese)

(责任编辑 张文涛)