

文丘里管结构参数对其水力性能的影响

孙艳琦, 牛文全

(西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

【摘要】 【目的】研究文丘里管结构参数对其水力性能的影响,为文丘里施肥装置的设计提供理论依据。【方法】以进口直径为 50 mm 的文丘里管为研究对象,应用 CFD 数值计算方法,研究不同进口压力及不同进出口压力差时,文丘里收缩段锥度、喉段收缩比、喉段长度等结构参数对出口断面平均流速、管内最小压力和临界压力差等水力性能的影响。【结果】文丘里管内最小压力发生在喉段进口环壁面处,最小压力与进出口压力差呈良好的线性关系,与收缩段锥度呈正相关关系,与喉段收缩比呈负相关关系;断面平均流速与压力差呈幂函数关系,流态指数为 0.53;喉段收缩比是影响文丘里施肥器性能的主要因子,局部水头损失系数及吸肥比均与其呈负相关关系。【结论】在设计文丘里施肥器时,应根据局部水头损失系数及吸肥比合理选择收缩比。

【关键词】 文丘里管;结构参数;水力性能

【中图分类号】 S274.2;TV131

【文献标识码】 A

【文章编号】 1671-9387(2010)02-0211-08

Effects of Venturi structural parameters on the hydraulic performance

SUN Yan-qi, NIU Wen-quan

(College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: 【Objective】 The effects of venturi structural parameters on its hydraulic performance were studied, which provides a theoretical basis for the design of Venturi injector. 【Method】 With the inlet diameter of 50 mm, based on the method of computational fluid dynamics (CFD), the effects of Venturi structural parameters such as throat taper, throat contraction ratio and throat length on its hydraulic performance such as outlet faceted average velocity, minimum pressure and critical pressure were studied under the condition of different inlet pressures and pressure differences between inlet and outlet. 【Result】 Minimum pressure occurred in the throat inlet wall, minimum pressure and the pressure difference between inlet and outlet showed a good linear relationship, with a positive correlation between minimum pressure and its throat taper, and a negative correlation between minimum pressure and throat contraction ratio; mean velocity in outlet section and pressure difference showed a power function relationship, and the flow stance index was approximately 0.53; throat contraction ratio was the main factor affecting Venturi injector performance, with a negative relationship between coefficient of local head loss and throat contraction ratio, also between absorption fertilizer ratio and throat contraction ratio. 【Conclusion】 For designing Venturi injector, contraction ratio should be reasonably selected according to the coefficient of local head loss and absorption fertilizer ratio.

Key words: Venturi injector; structural parameter; hydraulic performance

* [收稿日期] 2009-07-13

[基金项目] 国家科技支撑计划项目“低能耗小流量滴灌系统研发与产业化”(2007BAD38B07)

[作者简介] 孙艳琦(1983—),女,山东高青人,在读硕士,主要从事节水灌溉技术研究。E-mail:sunyanqi521@163.com

[通信作者] 牛文全(1971—),男,甘肃甘谷人,副研究员,博士,主要从事灌溉理论与节水新技术研究。

E-mail:nwq@vip.sina.com

施肥装置是滴灌系统中非常重要的设备之一，目前常用的施肥装置有压差施肥器、注肥泵、文丘里施肥装置等^[1-3]。文丘里施肥装置由于结构简单、使用方便，在实际生产中应用较广。因此，研究文丘里施肥装置结构参数对水力性能的影响，对改善和提高其工作性能具有重要的实际意义^[4-5]。侯素娟^[6]、沙毅等^[7]、沈雪民^[8]、孙笑英等^[9]对两段式文丘里泵施肥器进行了研究，确定了文丘里管的结构参数。李百军等^[10]、金永奎等^[11]分析了并联文丘里管喉部压力与前后压差和文丘里管参数之间的关系，确定了并联文丘里管前后倾角的优选参数范围。陈作炳等^[12]、王森等^[13]采用数值计算方法，研究了文丘里施肥器部分结构参数与施肥性能的关系，认为在进

口压力和凹槽位置一定的情况下，减小喉管直径、收缩段长度和增加凹槽直径，均能提高文丘里施肥器的吸肥量。但目前关于文丘里施肥装置结构参数对其施肥性能影响的研究相对薄弱，设计施肥性能高、水头损失小的文丘里施肥装置尚缺乏合理的理论依据。为此，本研究以文丘里管为研究对象，采用数值模拟方法研究文丘里施肥装置主要结构参数对流量、水头损失和吸肥量的影响，以为文丘里施肥器的合理设计提供依据。

1 模型与方法

1.1 物理模型及参数

本研究模拟试验的物理模型结构见图 1。

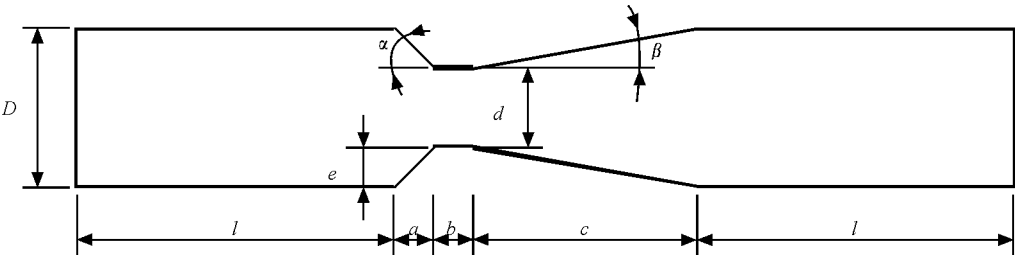


图 1 文丘里管的结构示意图

Fig.1 Structural diagram of the Venturi injector

图 1 中， D 为进出口直径(mm)， l 为进出口段长度(mm)， a 为收缩段长度(mm)， b 为喉管段长度(mm)， c 为扩大段长度(mm)， d 为喉管段的直径(mm)， e 为进口与喉管段的半径差(mm)， α 为收缩段锥度(rad)， β 为扩大角($^{\circ}$)。

模型结构参数见表 1，其中收缩比(λ_1)为喉管直径与文丘里管进口直径之比，即 $\lambda_1 = d/D$ ；喉管长径比(λ_2)为喉管长度与喉管直径之比，即， $\lambda_2 = b/d$ 。对表 1 中的结构参数进行组合，共确定了 36 个试验

处理，分别在不同的进口压力与进出口压力差下进行模拟试验，进口压力取 100, 150, 200, 250 和 300 kPa 等 5 个水平，出口压力设置见表 2。

表 1 文丘里管的结构参数

Table 1 Structural parameters of Venturi injector

D/mm	λ_1	λ_2	α/rad	$\beta/(^{\circ})$
50	0.25, 0.30, 0.40, 0.50	1.0, 1.5, 2.0	1.57, 2.09, 2.62	10

表 2 文丘里管不同进口压力时的出口压力

Table 2 Outlet pressures under different inlet pressures of Venturi injector

进口压力/kPa Inlet pressure	出口压力/kPa Outlet pressure	进口压力/kPa Inlet pressure	出口压力/kPa Outlet pressure
100	90, 80, 70, 50, 40	250	200, 170, 130, 100, 70
150	130, 110, 90, 70, 50	300	240, 200, 150, 120, 100
200	160, 140, 120, 100, 80		

1.2 数学模型

文丘里施肥器内的水流流动可视为不可压缩的稳定流动，符合质量和动量守恒定律，因此其基本控制方程由连续性方程和 Navier-Stokes 方程等构成^[14]，连续性方程为：

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0. \tag{1}$$

式中： u 、 v 、 w 分别为速度矢量(U)在 x 、 y 、 z 方向的

分量，单位为 m/s。

Navier-Stokes 方程为：

$$\begin{cases} \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla(\rho u U) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \nabla^2 u + F_x, \\ \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla(\rho v U) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \nabla^2 v + F_y, \\ \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla(\rho w U) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \nabla^2 w + F_z. \end{cases} \tag{2}$$

式中: ρ 为水的密度 (kg/m^3); μ 为水的动力粘度系数 ($\text{Pa} \cdot \text{s}$); t 为时间 (s); U 为速度矢量 (m/s); p 为流体微元体上的压力 (Pa); F_x 、 F_y 、 F_z 分别为单位体积上质量力在 x 、 y 、 z 方向的分量 (N),若质量力只有重力,且 z 轴竖直向上,则 $F_x = 0$, $F_y = 0$, $F_z = -\rho g$ 。

根据微尺度理论和试验研究可知,在微小尺度下,转捩雷诺数小于宏观尺度,而且在结构弯曲多变的流道内,除了靠近壁面的部分外,其他基本为湍流^[15]。因此,可采用标准 $k-\epsilon$ 湍流模型进行数值模拟^[16]。 $k-\epsilon$ 湍流模型中,湍动能取 k ,耗散率取 ϵ 。

1.3 网格划分

采用目前较通用的 CFD 软件 FLUENT 6.2 进行模拟分析。该软件采用有限体积法将微分方程简化为代数方程,采用一阶迎风差分格式计算;离散方程组的压力速度非耦合采用经典 SIMPLE 算法求解,收敛标准均取各因变量相邻 2 次的迭代残差。

表 3 文丘里管压力差与流速关系回归值

Table 3 Regression coefficients of pressure differences and velocity of Venturi injector					
编号 Number	k	x	编号 Number	k	x
M1	0.40	0.53	M19	0.67	0.53
M2	0.39	0.53	M20	0.65	0.53
M3	0.40	0.53	M21	0.66	0.53
M4	0.36	0.53	M22	0.60	0.53
M5	0.36	0.53	M23	0.60	0.53
M6	0.36	0.53	M24	0.60	0.53
M7	0.35	0.53	M25	0.57	0.53
M8	0.34	0.53	M26	0.56	0.53
M9	0.34	0.53	M27	0.56	0.53
M10	0.48	0.53	M28	0.84	0.52
M11	0.48	0.53	M29	0.84	0.53
M12	0.47	0.53	M30	0.84	0.53
M13	0.44	0.53	M31	0.77	0.53
M14	0.45	0.53	M32	0.76	0.53
M15	0.44	0.53	M33	0.76	0.53
M16	0.42	0.53	M34	0.73	0.53
M17	0.42	0.53	M35	0.73	0.53
M18	0.42	0.53	M36	0.72	0.53

从表 3 可以看出,不同结构参数组合处理的文丘里管流态指数 x 均为 0.53,参考我国微灌灌水器流态的判别标准可知,管内流态均为紊流。另外,由表 3 中 k 值和 x 值的变化可知,结构参数的变化对文丘里管流态指数 x 的影响较小,而对流速系数 k 的影响较大。

2.2 压力差与管内最小压力

通过试验可以发现,管内最小压力均发生在文丘里施肥器收缩段与喉管的连接处(图 2)。

当入口压力一定时,管内最小压力随着进出口

用 AutoCAD 建立二维模型,用 GAMBIT 2. 2. 30 进行网格划分,各部分均采用尺寸为 1 mm 的完全结构化六面体网格,共生成网格 3 万个左右。

2 结果与分析

2.1 压力差与出口断面的平均流速

通过数值计算,获得了所有处理的流场与压力场分布^[17],根据计算结果,可以进一步计算出流速与管内最低压力。对计算所得的进出口压力差与出口流速之间的关系进行分析,发现两者之间的关系可以用下式表示:

$$v=k \cdot h^x。$$
(3)

式中: v 为断面平均流速 (m/s), k 为流速系数, h 为进出口压力差 (kPa), x 为流态指数。

按照式(3)对 36 个处理的计算结果进行回归分析,获得各处理流速系数 k 和流态指数 x 的回归值(表 3)。

压力差的增大而减小,如当进口压力为 100 kPa、进出口压力差从 10 kPa 增加到 60 kPa 时,模拟结构 M1 的管内最小压力由 62 kPa 降低到 -146 kPa。而进出口压力差一定时,管内最小压力则随着进口压力的增大而增大,且具有如下关系:

$$H_1-H_2=h_1-h_2。$$
(4)

式中: H_1 、 H_2 分别为不同的进口压力 (kPa), h_1 、 h_2 分别代表进口压力为 H_1 、 H_2 时管内的最小压力 (kPa)。以模拟结构 M1 为例,当进出口压力差为 60 kPa,进口压力按 100,150,200,300 kPa 依次递

增时,管内最小压力依次为-146,-96,-46 和 54 kPa,其增幅与进口压力的增幅一致。

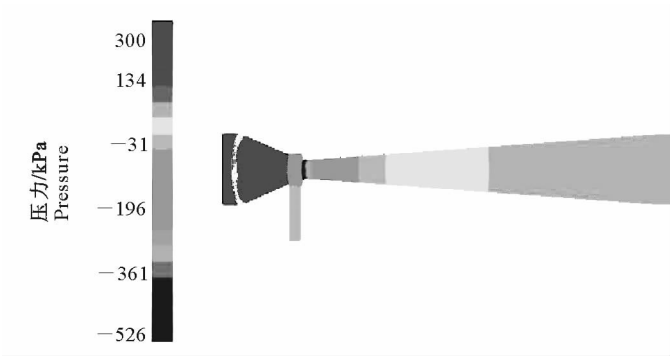


图 2 文丘里管的压力分布图

Fig. 2 Pressure profile patterns of Venturi injector

应用式(4)对管内最小压力进行换算,获得进口压力为 300 kPa 时,不同进出口压力差条件下管内的最小压力(图 3),并按照下式进行回归分析:

$$h_{\min} = m \cdot h + h' \quad (5)$$

式中: $h_{\min}$ 为管内最小压力(kPa), m 为压力差系数, h 为进出口压力差(kPa), h' 为管内理想压力(kPa)。回归分析得到的回归值见表 4。

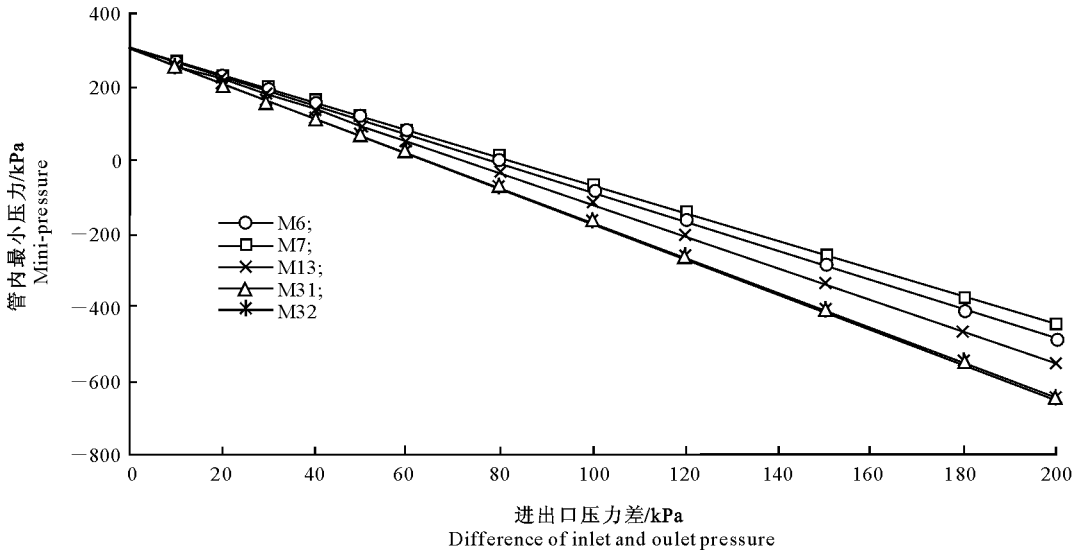


图 3 进口压力为 300 kPa 时文丘里管进出口压力差与最小压力的关系曲线

Fig. 3 Curve of inlet and outlet pressure on minimum pressure of Venturi injector

从图 3 可以看出,所有处理的压力差-最小压力关系曲线相交于一点。当进口压力为 300 kPa、进出口压力差为 0 时,管内最小压力为 312.6 kPa。当管内液体为理想液体(理想液体与管壁没有摩擦,也没有内粘滞力)、进出口压力差为 0 时,液体做匀速直线运动,运动过程中只发生动能与势能的转换,与环境之间不发生能量交换,在这种理想状态下,管内产生的最大压力即为 312.6 kPa。联合式(4)与式(5)可得:

$$h'_1 - h'_2 = H_1 - H_2 \quad (6)$$

式中: h'_1 、 h'_2 分别代表进口压力为 H_1 、 H_2 时管内的理想压力(kPa)。

则管内最小压力可以用下式计算:

$$h_{\min} = m \cdot h + h'_{\min} + H \quad (7)$$

式中: $h'_{\min}$ 代表进口压力为 0 时管内的理想压力(kPa), H 为进口压力(kPa)。

2.3 结构参数对临界压力差的影响

当进口压力一定、管内最小压力为 0 时,可应用式(7)反算进出口压力差 h_{cr} ,当进出口压力差大于 h_{cr} 时,管内最小压力为负值;当进出口压力差小于 h_{cr} 时,管内最小压力为正值。本研究将 h_{cr} 定义为临界压力差,其计算公式为:

$$h_{cr} = \frac{H + h'_{\min}}{m} \quad (8)$$

表 4 文丘里管进出口压力差—管内最小压力的回归值

Table 4 Regression coefficient of minimum pressure and pressure between inlet and outlet of Venturi injector					
编号 Number	m	$h_{\min}$	编号 Number	m	$h_{\min}$
M1	-4.33	311	M19	-4.99	312
M2	-4.30	313	M20	-4.94	313
M3	-4.31	311	M21	-4.88	312
M4	-3.97	312	M22	-4.75	314
M5	-3.95	312	M23	-4.79	315
M6	-3.96	312	M24	-4.76	315
M7	-3.80	312	M25	-4.33	313
M8	-3.74	311	M26	-4.35	314
M9	-3.78	312	M27	-4.35	314
M10	-4.38	312	M28	-5.06	309
M11	-4.47	312	M29	-5.12	310
M12	-4.40	312	M30	-5.08	310
M13	-4.32	313	M31	-4.80	312
M14	-4.31	313	M32	-4.77	312
M15	-4.32	315	M33	-4.81	313
M16	-3.98	312	M34	-4.44	312
M17	-3.98	313	M35	-4.45	312
M18	-3.99	313	M36	-4.44	312

假设进口压力为 300 kPa,用式(8)计算表 4 中各处理的 h_{cr} ,分析不同收缩段锥度(α)下,喉段收缩比对 h_{cr} 的影响,并绘制二者的相关关系曲线,结果见图 4。

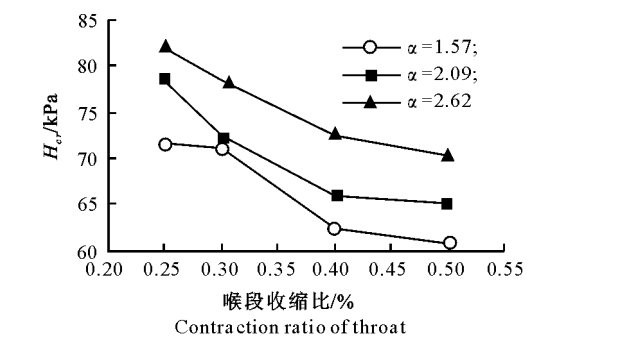


图 4 文丘里管喉段收缩比对临界压力差(h_{cr})的影响
Fig.4 Effects of throat contraction ratio on critical pressure of Venturi injector

从图 4 可以看出,当喉段收缩比一定时, h_{cr} 差随着收缩段锥度的增大而增大。因此,在文丘里施肥器的设计过程中,当喉段收缩比一定时,为了产生更好的负压效果,应尽量减少收缩段的锥度,使文丘里施肥器在较小水头损失下能产生理想的负压,从而实现较优的施肥效果。从图 4 还可以看出,当收缩段锥度一定时, h_{cr} 与喉段收缩比呈负相关关系,说明当进口压力一定、其他结构参数不变时,随着喉管直径的增大,喉段进口处更易产生负压;随着喉段收缩比的增大, h_{cr} 减小的趋势变缓,提示在文丘里施肥器设计过程中,喉段收缩比的选择要适宜,不可

太小。
2.4 结构参数对出口流速的影响

结构参数对文丘里施肥器流量(出口断面平均流速)影响很大。通过对数值计算结果的分析可知,影响流速的主要结构参数有喉段收缩比、收缩段锥度、喉管直径、收缩段长度、扩大段收缩比及喉管长度等,其中喉段收缩比、收缩段锥度、喉管直径对流速的影响较为显著。当进口压力确定时,流速主要由喉段收缩比与收缩段锥度决定,其中以喉段收缩比的影响最为显著。表 3 显示,各处理流态指数的回归值均为 0.53,即结构参数对流速的影响也就是其对流速系数 k 的影响。综合分析喉段收缩比与收缩段锥度 α 对流速系数 k 的影响,并分别绘制喉段收缩比、收缩段锥度与流速系数 k 的关系曲线,(图 5)。

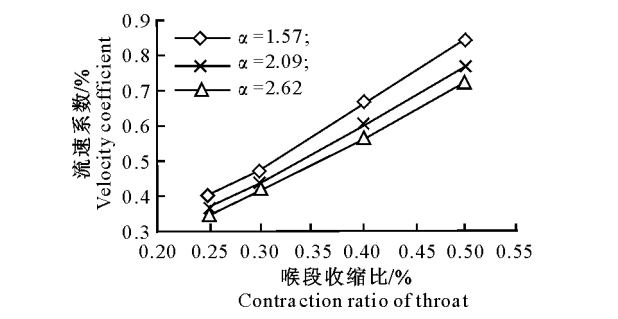


图 5 文丘里管喉段收缩比对流速系数的影响
Fig.5 Effects of throat contraction ratio on velocity coefficient of Venturi injector

从图 5 可以看出,流速系数 k 随着收缩段锥度

α 的增大而减小,但减小的幅度逐渐变小;流速系数 k 随着喉段收缩比的增大而增大,且增大的幅度逐渐变大。说明随着收缩段锥度 α 或者喉段收缩比的增大,文丘里管局部水头损失均呈增大趋势,出口断面平均流速呈减小趋势。对表 3 中的数据进行回归分析,获得进、出口直径为 50 mm 的文丘里管流速系数的计算公式为:

$$k=0.113\ 1+1.646\ 9\lambda_1-0.076\ 7\alpha, \\ R^2=0.994\ 4. \tag{9}$$

2.5 结构参数对管内最小压力的影响

结构参数对最小压力的影响相当于其对压力差系数 m 的影响,通过对计算数据的分析认为,喉段收缩比、收缩段锥度对最小压力的影响较为显著。结合表 4 计算结果,综合分析喉段收缩比 α 和收缩段锥度对压力差系数 m 的影响,并绘制喉段收缩锥度 α 、喉段收缩比与压力差系数 m 的关系曲线,结果见图 6。

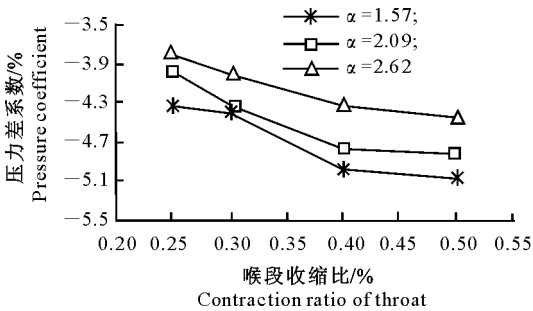


图 6 文丘里管喉段收缩比对压差系数的影响
Fig. 6 Effects of throat contraction ratio on pressure coefficient of Venturi injector

从图 6 可以看出,压力差系数 m 与收缩段锥度呈正相关关系,说明收缩段锥度对管内压力分布具有较大影响,为了获得最佳管内负压,应适当增大收缩段锥度;压力差系数 m 随着喉段收缩比的增大而减小,且减小的幅度逐渐变小,即当进出口管径一定、其他结构参数不变时,管内最小压力绝对值随着喉段管径的增大而增大。当喉段收缩比 ≤ 0.5 时,如果喉段直径过小,则其流速很大,易发生汽化现象,不利于产生较好的负压效果,因此适当增加喉段管道直径,有利于形成有效的吸肥负压。压力差系数 m 也可以用喉段收缩比与收缩段锥度来表示,即:

$$m=-4.403\ 0-3.128\ 4\lambda_1+0.529\ 0\alpha, \\ R^2=0.963. \tag{10}$$

2.6 结构参数对水头损失和吸肥比的影响

由于文丘里施肥器长度较短,因此在计算水头

损失时,可以忽略沿程水头损失,则其局部水头损失的计算公式为:

$$h_j=\zeta\frac{v^2}{2g}. \tag{11}$$

式中: h_j 为局部水头损失(m),在本文中即为进出口压力差 h ; ζ 为局部水头损失系数(%); v 为出口断面平均流速(m/s); g 为重力加速度($9.8\text{ m}^2/\text{s}$)。

应用式(11)反算局部水头损失系数 ζ 。分析发现,文丘里施肥器的局部水头损失非常大,本研究测试的文丘里施肥器的局部水头损失系数为 2.25~13.27,当喉段收缩比为 0.25~0.50 时, ζ 随着喉段收缩比的增大而迅速减小,而且受其他结构参数的影响较小,可以近似表示为 $\zeta=0.5\lambda_1^{-2.16}$ 。另外,分析还发现,局部水头损失系数随着进出口压力差的增大而减小,其原因可能与流态变化有关。用雷诺数来分析管道内流态,有:

$$R_e=\frac{vd}{\gamma}. \tag{12}$$

式中: R_e 为雷诺数(%); γ 为水的运动粘滞系数(m^2/s),当温度为 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 时, $\gamma=1.01\times 10^{-6}\text{ m}^2/\text{s}$ 。

应用式(12)计算的雷诺数为 14 356~335 643,按照水力学判断标准可知,水流属于紊流流态,且随着进出口压力差的增大,雷诺数也增大,水流内部相互运动增强,粘滞力引起能量转化增大,而流体与结构之间做功造成的能量转化比重下降,这也解释了局部水头损失系数随进出口压力差增大而减小的原因。

结构优良的文丘里施肥器必然具有较小的局部水头损失系数和较大吸肥比 η 。本研究通过数值计算获得了文丘里施肥器主管道的驱动流量与管内最小压力,因此可以按照管道流水力学计算方法预测各处理的吸肥量。假设液肥表面为标准大气压,与文丘里管道的距离为 0.5 m,吸肥管直径为 8 mm,不考虑水头损失时,可按照下式预测吸肥量:

$$q=A\sqrt{2gh_0}. \tag{13}$$

式中: q 为吸肥量(m^3/s); h_0 为吸肥管进出口水头差,本研究为管内最小压力水头与液肥表面和文丘里管之间的距离之差(m)。

通过计算发现,当收缩比较大(0.4 或 0.5)时,进出口压力差为 80 kPa 就可以稳定吸肥,吸肥比 η 约为 0.5;而当收缩比小于 0.3 时,仅当进出口压力差为 100 kPa 时才可以稳定吸肥;当进出口压力差一定时,吸肥比 η 随着收缩比的增大而减小。

图 7 为进出口压力差为 150 kPa、进口压力为

300 kPa 时,收缩比与局部水头损失系数 ζ 及吸肥比 η 的关系曲线。从图 7 可以看出,随着收缩比的增大,局部水头损失系数 ζ 及吸肥比 η 均呈下降趋势。因此,在设计文丘里施肥器时,不能选择过大或者过小的喉段直径,应根据局部水头损失系数及吸肥比合理地选择适宜的喉段直径。

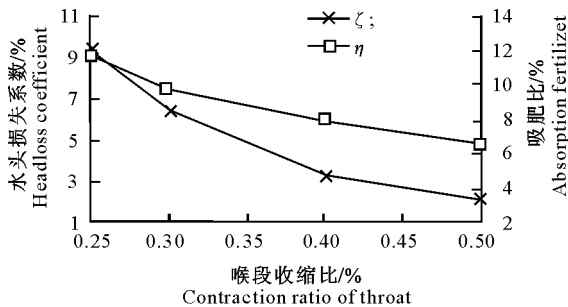


图 7 文丘里管喉段收缩比对水头损失系数及吸肥比的影响

Fig. 7 Effects of throat contraction ratio on head loss and absorption fertilizer of Venturi injector

喉管长度对临界压力差、管内最小压力及流速的影响非常小,因此喉管长度对文丘里施肥装置性能的影响可以忽略,这与文献[13]的研究结果基本相同。

3 结 论

1)影响文丘里施肥器性能的结构参数有收缩段锥度、喉段收缩比、喉段长度、扩大段锥度等,其中收缩比与收缩段锥度对其影响较大;收缩段锥度与出口断面平均流速呈负相关关系,与管内最小压力呈正相关关系;喉段收缩比与出口断面平均流速呈正相关关系,而与管内最小压力呈负相关关系。

2)断面平均流速与进出口压力差呈良好的幂函数关系,流态指数约为 0.53,流速系数主要受收缩比与收缩段锥度的影响。

3)在文丘里施肥器喉段进口处环管壁产生管内最小压力,最小压力发生位置受施肥管开口位置和孔径大小的影响非常小,管内最小压力与进出口压力差呈良好的线性关系;当进口压力确定时,压力差与最小压力曲线总是经过固定的一点,该点的坐标不受进出口压力差的影响。

4)喉段收缩比与局部水头损失系数、吸肥比均呈负相关关系,建议在文丘里施肥器设计过程中,应根据上述 2 个因子选择适宜的收缩比。

【参考文献】

[1] 康绍忠,胡笑涛,蔡焕杰,等. 现代农业与生态节水的理论创新

及研究重点[J]. 水利学报,2004,35(12):1-7.

Kang S Z, Hu X T, Cai H J, et al. New ideas and development tendency of theory for water saving in modern agriculture and ecology[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 35(12): 1-7. (in Chinese)

[2] 牛文全,吴普特,范兴科. 低压滴灌系统研究[J]. 节水灌溉, 2005(2):29-30,32.

Niu W Q, Wu P T, Fan X K. Low-pressure drip irrigation system[J]. Water Saving Irrigation, 2005(2):29-30,32. (in Chinese)

[3] 牛文全,吴普特,范兴科. 微灌系统综合流量偏差率的计算方法[J]. 农业工程学报,2004,20(6):85-88.

Niu W Q, Wu P T, Fan X K. Method for calculating integrated flux deviation rate of micro-irrigation system[J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(6): 85-88. (in Chinese)

[4] 李伏生,陆申年. 灌溉施肥的研究和应用[J]. 植物营养与肥料学报,2000,6(2):233-240.

Li F S, Lu S N. Study on the fertigation and its application[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2000, 6(2): 233-240. (in Chinese)

[5] 李久生,张建君,薛克宗. 滴灌施肥灌溉原理与应用[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2003.

Li J S, Zhang J J, Xue K Z. Principles and applications of fertigation through drip irrigation systems[M]. Beijing: Chinese Agricultural Science and Technology Press, 2003. (in Chinese)

[6] 侯素娟. 两段式文丘里泵施肥器的设计[J]. 排灌机械, 1995, 13(4):44-46.

Hou S J. Design on two parts pattern venturi tube[J]. Drainage and Irrigation Machinery, 1995, 13(4): 44-46. (in Chinese)

[7] 沙毅,侯素娟. 并联式文丘里管施肥器试验研究[J]. 排灌机械, 1995, 13(2):37-39.

Sha Y, Hou S J. Experimental research on applying fertilizer apparatus of parallel Venturi tubes[J]. Drainage and Irrigation Machinery, 1995, 13(2): 37-39. (in Chinese)

[8] 沈雪民. 介绍 100Ps-1 型文丘里式喷灌施肥装置[J]. 节水灌溉, 2000(11):14-15.

Sheng X M. Introduction of 100Ps-1 Venturi fertilizer applicator[J]. Water Saving Irrigation, 2000(11):14-15. (in Chinese)

[9] 孙笑英,武寿玉. 压差吸入式喷灌施肥器介绍[J]. 节水灌溉, 2003(5):36-37.

Sun X Y, Wu S Y. Introduction of fertilizer applicator by pressure difference[J]. Water Saving Irrigation, 2003(5): 36-37. (in Chinese)

[10] 李百军,毛罕平,李凯. 并联文丘里管吸肥装置的研究及其参数选择[J]. 排灌机械, 2001, 19(1):42-45.

Li B J, Mao H P, Li K. A study on the parallel connection Venturi tube and its parameter selection[J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2001, 19(1): 42-45. (in Chinese)

[11] 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.

Jin Y K, Xia C H, Fang B L. Research and development of Venturi fertilizer applicator series[J]. China Rural Water and

Hydropower,2006(5):14-16. (in Chinese)

[12] 陈作炳,豆海建,陈思维,等. 文丘里管流场的数值研究 [J]. 中国水泥,2005(4):61-63.
Chen Z B,Dou H J,Chen S W,et al. Numeral research on flow field of Venturi tube [J]. China Building Material Equipment, 2005(4):61-63. (in Chinese)

[13] 王 森,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,2007,23(7):27-31.
Wang M,Huang X F,Li G Y. Numerical simulation of characteristics of Venturi injector [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 23(7): 27-31. (in Chinese)

[14] 吴持恭. 水力学 [M]. 北京:高等教育出版社,1992.
Wu C G. Hydraulics [M]. Beijing: Higher Education Press, 1992. (in Chinese)

[15] Dasberg S,Bresler E. Drip irrigation manual [M]. Bet Dagan, Israel:International Irrigation Information Center Publication No 9,1985.

[16] 王瑞环,赵万华,杨来侠,等. 基于快速成形技术滴头的结构试验研究 [J]. 西安交通大学学报,2003,37(5):542-545.
Wang R H,Zhao W H,Yang L X,et al. Experimental study of the water-saving emitter structure based on rapid prototyping [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2003, 37(5): 542-545. (in Chinese)

[17] 王福军. 计算流体动力学分析-CFD 软件原理与应用 [M]. 北京:清华大学出版社,2004.
Wang F J. Analysis on computational fluid dynamics-principle and application of CFD software [M]. Beijing: Tsinghua University Press,2004. (in Chinese)

(上接第 210 页)

[14] 邓念武,陈 正,叶泽荣. 基于遗传算法的偏最小二乘回归模型在大坝安全监测中的应用 [J]. 大坝与安全,2007(4):33-34.
Deng N W,Chen Z,Ye Z R. Modeling of partial least-squared regression and genetic algorithm in dam safety monitoring analysis [J]. Dam and Security,2007(4):33-34. (in Chinese)

[15] 陈维江,马震岳,董毓新. 建立大坝安全监控数学模型的一种新方法 [J]. 水利学报,2002,33(8):91-93.
Chen W J,Ma Z Y,Dong Y X. New method for establishing mathematical model of dam safety monitoring [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2002,33(8):91-93. (in Chinese)

[16] 陈维江,马震岳,董毓新. 大坝安全监测遗传回归模型研究及应用 [J]. 水电能源科学,2002,20(2):39-40.
Chen W J,Ma Z Y,Dong Y X. Genetic regression model for dam safety monitoring [J]. Hydroelectric Energy, 2002, 20(2):39-40. (in Chinese)

[17] 徐金明. MATLAB 实用教程 [M]. 北京:清华大学出版社,2005.
Xu J M. Practical guide of MATLAB [M]. Beijing:Publishing Company of Tsinghua University,2003. (in Chinese)

[18] 李火坤,练继建,朱济祥,等. 李家峡拱坝变形原型观测资料分析及安全监控模型研究 [J]. 南昌大学学报:工科版,2006,28(3):289-294.
Li H K,Lian J J,Zhu J X,et al. Deformation analysis of the prototype observation data and research on monitoring model of safety of Lijiaxia Arc Dam [J]. Journal of Nanchang University:Engineering & Technology,2006,28(3): 289-294. (in Chinese)