

文章编号: 1000-4750(2019)11-0248-09

内镶式滴灌管主流道水流运动特性研究

丁法龙, 茅泽育, 韩 凯

(清华大学水利水电工程系, 北京 100084)

摘 要: 以质量和动量守恒定理为依据, 建立了以内镶式滴灌管为例的多孔管流动数学模型, 并结合水力试验数据, 推导得出了内镶式滴灌管内部主流道的沿程压力分布模型。多孔管流动的数学模型表明: 多孔管主流道内的压力大小及变化取决于摩阻作用和动量交换作用的相对大小, 其中摩阻作用使得压力降低, 动量交换作用使压力升高, 多孔管压力分布模型可以归结为求解管路摩阻系数和动量交换系数。滴灌管水力试验表明: 滴灌管沿程纵向流速的分布指数与滴头自身特性(流量系数、流态指数)无关, 而与管路上的滴头个数呈良好的线性相关关系。以水力试验数据分析与理论推导为基础, 得出动量交换系数所对应的经验表达式, 结合 BLASIUS 摩阻系数计算公式对滴灌管压力分布模型进行求解, 模型预测值与实测值吻合良好。该压力分布模型中, 将沿程压力分布的影响因素归结为滴灌管长径比和管首雷诺数, 便于优化结构设计及确定最佳运行工况。该文可为多孔管路水力计算及变质量流动模型研究提供一定参考。

关键词: 滴灌管; 主流道; 变质量流动; 摩阻; 动量交换; 沿程压力分布

中图分类号: S275.6 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2018.11.0625

HYDRAULIC PERFORMANCES IN MAINSTREAM OF DRIP IRRIGATION PIPE

DONG Fa-long, MAO Ze-yu, HAN Kai

(Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Based on the theorem of mass and momentum conservation, this study established an analytical model for variable mass flow, and thus developed a mathematical expression for the longitudinal pressure distribution along the mainstream of a drip irrigation pipe combined with experimental data. The established model shows that the longitudinal pressure distribution in the drip irrigation pipe is dependent on friction head loss and momentum exchange, and that friction head loss tends to decrease the pressure and the momentum exchange tends to increase it. The solution of the longitudinal pressure distribution model is attributed to determining friction and momentum exchange coefficients. The test results show that distribution index of longitudinal velocity is independent of the characteristic parameters of the drip irrigation pipe, but linear with the number of drip emitters. The expression for the momentum exchange coefficient was obtained by theoretical derivation and regression analysis, and the friction coefficient can be calculated by Blasius formula. The analytical model for variable mass flow and the longitudinal pressure expression for the drip irrigation pipe was then solved. The calculated values of the longitudinal pressure along the drip irrigation pipe agreed well with measured values. In the longitudinal pressure expression, pressure is affected by a pipe-structure parameter (length-diameter ratio)

收稿日期: 2018-11-20; 修改日期: 2019-09-23

基金项目: 国家重点研发项目(2016YFC0402504)

通讯作者: 丁法龙(1991—), 男, 山东人, 博士生, 从事水力学及河流动力学研究(E-mail: dflaizy@163.com).

作者简介: 茅泽育(1962—), 男, 浙江人, 教授, 博士, 主要从事水力学及河流动力学研究(E-mail: maozy@mails.tsinghua.edu.cn);

韩 凯(1995—), 男, 浙江人, 硕士生, 从事水力学及河流动力学研究(E-mail: hk17@mails.tsinghua.edu.cn).

and a flow parameter (entrance Reynolds number). The expression helps guide the structural design and optimize operating conditions, because the two parameters are both directly controllable. This study offers a new thought for the analysis of variable mass flow, and the results would provide a scientific basis for the hydraulic calculation of drip irrigation.

Key words: drip irrigation pipe; mainstream way; variable mass flow; friction resistance; momentum exchange; longitudinal pressure distribution

灌从作物本身出发, 根据具体的需水量, 利用灌水器与管道系统, 缓慢且均匀的将养分与水分滴入根区土壤的一种灌水方法, 它能够较准确地控制灌水量, 还能自动化管理, 因而在农业生产中得到了快速推广应用^[1]。在滴灌质量评估体系中, 灌水均匀度是核心指标, 也是滴灌系统水力设计的控制性指标^[2], 其影响因素包括滴灌管内部主流道沿程压力分布, 灌水器的厂家制造偏差及微地形偏差等, 然而最重要的是滴灌管主流道的分布情况是沿着程压力的^[3-4]。如果忽略灌水器内部微流道的几何形式对水流的局部影响, 可简化地认为低头安装处滴灌管主流道压力水头都进行了转化, 变成微流道内水流在沿程水头上产生的损失, 通过 Darcy-Weisbach 能够计算出, q 与 h 的指数型关系为^[5]:

$$q = Cp^y \quad (1)$$

式中: q 为滴头流量, L/h ; p/MPa 为滴头安装位置产生的滴灌管主流道压力; C 和 y 分别为流量系数和流态指数, 是表征滴头水力特性的两个特征参数。

由式(1)可见, 滴头流量除了与 C 、 y 存在一定关联之外, 还与滴水位置主流道的压力值存在主要关联, 所以, 滴灌管其灌水的均匀度主要受到整个管路上主流道的沿程压力分布情况的作用, 即开展滴灌管路的水利设计之前, 首先就需要详细调查滴灌管主流道各处压力情况。

围绕如何确定滴灌管路沿程压力分布, 国内外学者开展大量分析研究, 早在 1942 年, 学者 Christiansen 就已经借助多孔系数法对多孔管路的水头损失进行模拟, 为后续计算多孔管路压力提供了理论基础。Wu 等^[6-8]学者经过了一系列研究与分析, 设计实现能量坡度线方法, 可明确管路所对应的沿程压力分布情况, 这使得滴灌管等多孔管的沿程压力分布廓线很大的简化了, 然后提出当变坡度与管径已经确定的情况下如何计算管路水力。Jain 等^[9]学者通过经验公式创建出压力损失计算模型, 且定性分析了该模型, 但其计算过程繁琐, 适用性

较差。Kang、Nishiyam 等^[10-12]采用有限单元法计算并找出滴灌管路水头损失存在的规律。

伴随滴灌技术的推广和计算科学的发展, 更多的滴灌水力学研究并非一定以假设为基础而展开理论解析, 其中部分假设是通过试验结果展开多因素系统的回归分析^[13-18]。并且, 近年来在滴灌设计和计算方面, 也不断出现了新的计算方法, 比如二分法^[19]、遗传算法^[20]、人工神经网络^[21]、CFD 技术^[22-24]等。

上述研究大多是通过计算滴灌管主流道的水头损失来确定沿程压力分布, 即提出摩阻损失是唯一对压力分布产生影响的因素。然而如果采用该方法来计算主流道的压力值, 那么就需要解决以下问题^[25]: 1) 能量守恒定律是以总能量守恒为基础, 而水力学能量方程—伯努利方程和水头损失的计算公式, 是利用单位质量流体展开相关计算, 该方法只能用于与外界保持隔离的流动体系, 然而滴灌管明显不符合这一条件, 当流体经过滴头, 低能的边界层流体会通过滴头孔口流出, 而相对高能的流体留在滴灌管主流道内, 形成能量的再分布, 若依然采用该方法, 与分流前相比, 流体在分流后其机械能明显减小, 出现了违背能量守恒定律的现象。2) 水力学能量方程—伯努利方程是根据流线或元流加以建立, 对于滴灌工程, 流体每次分流都会出现新流线, 管路存在非平行的多条流线, 在各个过流断面, 其流线的数量也存在差异, 因此, 若根据流线构建能量方程及计算能量损失会有多种结果。

因此, 以单位质量流体建立的恒定总流能量方程不适用于滴灌管这类多孔管的主流道能量计算, 尽管绝大多数研究得到的滴灌管主流道的压力分布均是沿程下降的, 但所测得的压力是分流后能量再分布与摩阻损失这两者共同作用的结果, 以上研究结果所表现出的压力下降只能说明在这些工况条件下, 两者相比摩阻作用占优势, 并不能证明能量方程应用于滴灌管主流道计算的合理性。实际上,

摩阻作用并非总是占据优势地位,如 McNown^[26]的多孔出流试验显示,确实存在分流后主流道内压力增大的现象,杜涛等^[27]认为这种管道末端压力水头升高的现象类似于水击,并用直接水击的理论计算了压强恢复值,滴灌管主流道内的流体属于恒定非均匀流,与水击这种瞬变流在发生条件和流动机理上差异较大,因此水击压强的观点对该压力升高现象解释力不强。作者在进行滴灌管水力性能试验时,也遇到压力在管路沿程上呈现非单调变化的情况,通过多次重复试验,确定不是偶然因素造成。

滴灌管为沿程泄流管,主流道流体不断分流中其质量就会逐渐减少。对于这种质量不恒定的流动,笔者以动量分析法进行计算,依据质量守恒和动量守恒原理,建立了变质量流动的数学模型,模型表明沿程压力变化同时受动量交换和摩阻损失带来的影响,按照滴灌工程主流的操作条件与管路结构,展开压力试验,根据检测数据对动量交换的系数变化进行分析,总结其规律,接着采用动量工程计算沿程压力,从而使水利设计更加合理,为研究变质量流动给出相关参考。

1 理论模型

1.1 滴灌管主流道动量方程

滴灌管主流道内的流动可以简化为沿程多孔出流,即等间距布置侧流空口且末端封堵的长直圆形断面管道。

根据多孔管流动特性,各孔口的流量分布将依赖主流道内的轴向压力分布,选择多孔管的侧流孔口前后的任微元段当作控制体,具体见下图,从动量守恒定理出发创建方程。

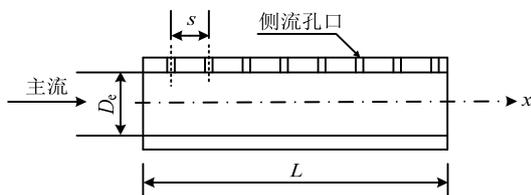


图1 滴灌管分流结构简化模型

Fig.1 Simplified model of drip irrigation pipe

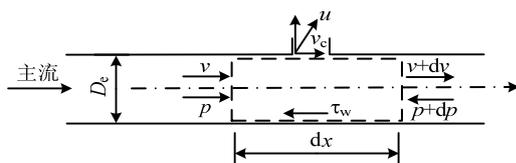


图2 微元控制体示意图

Fig.2 Micro-element control volume

设滴灌管主流道的过流断面面积为 A_c ,图2中左侧虚线所示界面处(孔口前)轴向流速为 v ,压力为 p ,流动一段距离 dx 后至右侧虚线处(孔口后),轴向流速为 $v+dv$,压力为 $p+dp$,则在两个截面之家单位时间流过的流体所具有的动量为 $\rho A_c v^2$ 和 $\rho A_c (v+dv)^2$ 。在恒定流条件下,根据动量定理,流体动量的增量是轴向作用力的结果,在微元段 dx 上,作用于控制体的轴向力有压力和管壁摩阻力,因此,动量方程可写为:

$$-A_c dp - \pi D_c \tau_w dx = \rho A_c [(v+dv)^2 - v^2] \quad (2)$$

对等截面圆管,单位面积上管壁对控制体的摩阻力:

$$\tau_w = \rho \lambda (v^2 / 8) \quad (3)$$

代入式(3)后整理得到:

$$\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dx} + \frac{\lambda}{2D_c} v^2 + 2v \frac{dv}{dx} = 0 \quad (4)$$

式中: D_c 为滴灌管内径; λ 为滴灌管内壁摩阻系数。

由式(4)可见,主流道内沿轴向的压力变化取决于两项: $\lambda v^2 / 2D_c$ 表征滴灌管内壁的摩阻作用, $2v dv / dx$ 表征流体的动量输运作用。式(4)是基于孔口流出的流线垂直于轴线的假定得到的动量微分方程式,未考虑侧向孔口流体带走的轴向动量分量,未考虑孔口对管壁边界层的影响,因此,需对动量输运项进行修正,即在保证摩阻项不变的前提下,将动量输运项乘上一个修正系数 k ,称为动量交换系数,即:

$$\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dx} + \frac{\lambda}{2D_c} v^2 + 2kv \frac{dv}{dx} = 0 \quad (5)$$

引入动量交换系数来进行有效的处理,此种方法无需考虑侧流孔口周围产生的流动情况,而是将模型简化误差都包含在这一系数中,直接对孔口所带走的部分轴向动量分量予以修正。

式(5)滴灌管主流道的沿程压力受到流体动量交换作用和管壁摩阻作用两个部分决定,所以在计算过程中,需要确定 λ 及 k ,具体讨论内容如下所示。

1.2 摩阻系数

尼古拉兹深入研究了通过人工的方式选择砂砾对圆管进行加糙过的摩阻系数,求出水流流态分区不同情况下 λ 随各种参数的变化情况而形成的变化曲线。相较于相同材质、相同管径及管长、相同入口流量的完整长直圆管,多孔管内的摩阻水头损失更小,在工程计算过程中通常选择完整管为对

象, 对 λ 进行折减, 从而可得多孔管所对应的平均摩擦系数, 其折减系数就是多孔系数, 一般情况下多孔系数表达式为克里斯钦森多孔系数公式^[13]:

$$F = \frac{1}{n+1} + \frac{1}{2N} + \frac{\sqrt{n-1}}{6N^2} \quad (6)$$

式中: F 为克里斯钦森多孔系数; n 为流量指数, 通常是取 1.75; N 代表的是孔口数。

多孔系数法忽略了 λ 的沿程情况, 通过平均值来达到简化处理的目的。本文以动量守恒定律为基础创建出变质量动量数学模型从而选择分流口前后不同的微元体来进行研究, 其中 λ 是指 dx 管段产生具体的摩擦值, 与其他因素没有关系。从而按照完整管的情况对多孔系数进行折减计算, 并且选择有关纵向流速的连续函数来表示, 具体可参考 3.1 节, 相较而言与物理真实更加符合^[25]。通过尼古拉斯试验可知, λ 与 Re 有以及管壁粗糙高度之间具有一定关系。从滴灌管层面进行分析, 主流道的 Re 沿程一直改变, 流态根据不同段产生了相应的转换, 具体而言管段不同的情况下根据流态分区逐管段来对其 λ 进行计算, 然而研究^[28-29]结果显示, 当滴灌管的材质为 PE, 则整个管路都根据紊流光滑区对摩擦系数进行计算, 就需要确保较高精度, 也就是 λ 计算需要使用紊流光滑区的 Blasius 阻力公式:

$$\lambda = 0.3164 / Re^{0.25} \quad (7)$$

式中, 雷诺数 $Re = vD_e / \nu$, D_e 、 ν 分别为滴灌管内径和水的运动粘度。

1.3 动量交换系数 k

由式(5)可见, 动量交换系数是求解变质量流动模型的关键之一。经过方程推导可知, 动量交换系数的引用可以修正滴灌管的侧留孔口的一些轴向动量分量, 孔口将一些轴向分量带走, 从而引起测流孔的前后主流道流速发生改变, 也就是孔口的出流所带走轴向动量能够反映出主流动量的改变情^[25], 即:

$$k \propto \frac{\Delta(v^2)}{v^2} \quad (8)$$

式(8)表明 k 的函数形式取决于相对动能差的表达式。现作分析:

$$\frac{v_{i+1}^2 - v_i^2}{v_i^2} = \frac{(v_i + v_{i+1})(v_{i+1} - v_i)}{v_i^2} = \frac{2v_\xi \Delta v}{v_i^2} \quad (9)$$

式中, $\Delta v = v_{i+1} - v_i$, $v_i + v_{i+1} = 2v_\xi$ 为中值定理。

两边同除以 Δx 并取极限:

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{v_{i+1}^2 - v_i^2}{v_i^2 \Delta x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{2v_\xi \Delta v}{v_i^2 \Delta x} = \frac{2v'}{v} \quad (10)$$

即:

$$\left[\frac{v_{i+1}^2 - v_i^2}{v_i^2} \right]' = 2 \frac{v'}{v} \quad (11)$$

对式(10)从 0 到 x 积分, 得到函数式:

$$\frac{v_{i+1}^2 - v_i^2}{v_i^2} = \int_0^x 2 \frac{v'}{v} = 2 \ln \frac{v}{v_0} \quad (12)$$

式中, v_0 为滴灌管入口流速。

联立式(8)和式(12), 得到:

$$k \propto \ln \frac{v}{v_0} \quad (13)$$

式(13)表明, k 与管内流体的纵向流速分布存在一定关联, 因为沿程发生泄流, 滴灌管其流体流速在纵向分布上表现为阶梯式降低, 为了方便计算, 将这一过程简化成指数型指数型连续函数形式:

$$\frac{v}{v_0} = \left(1 - \frac{x}{L} \right)^m = (1 - \bar{x})^m \quad (14)$$

式中: x/m 为该处距滴灌管入口的长度; L/m 为滴灌管长度; $\bar{x} = x/L$ 称为管路相对坐标。

结合式(13)、式(14), 可知:

$$k \propto \ln(1 - \bar{x}) \quad (15)$$

根据以上分析, 确定动量交换系数 k 的函数形式为:

$$k = a + b \ln(1 - \bar{x}) \quad (16)$$

式中, a 、 b 均为待定参数。

将式(5)在主流道的任意两截面 $A-A$ 和 $B-B$ 间积分, 可得:

$$p_A - p_B = \rho g h_{f_{AB}} + \rho k (v_B^2 - v_A^2) \quad (17)$$

即:

$$k = \frac{p_A - p_B - \rho g h_{f_{AB}}}{\rho (v_B^2 - v_A^2)} \quad (18)$$

式中: p_A 、 p_B 表示的是 A 与 B 两测点产生的压力; v_A 、 v_B 表示的是 A 与 B 两测点对应的纵向流速; $h_{f_{AB}}$ 表示的是 A 与 B 两测点间存在的摩擦水头损失。

根据式(18), 对不同工况条件下不同管段位置的动量交换系数 k 进行试验测量, 并对式(16)所示的表达式进行数据回归。

1.4 主流道沿程压力

通过变质量流动数学模型了解到,滴灌管主流道产生的压力由 λ 与 k 决定,通过上述内容可知, λ 和 k 的函数表达式已确定。从而可求解方程式(5)将 λ 表达式(7)、 k 表达式(16)和滴灌管纵向流速分布式(14)代入式(5),得:

$$\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dx} + \frac{0.1582\nu^{0.25}}{D_e^{1.25}} v_0^{1.75} (1-\bar{x})^{1.75m} + v_0^2 [a + b \ln(1-\bar{x})] \frac{d(1-\bar{x})^{2m}}{dx} \quad (19)$$

构造量纲一的量 $\Delta P = \frac{2(p_{\bar{x}} - p_0)}{\rho v_0^2}$, 称 ΔP 为 \bar{x} 位置的相对压力差。式(19), $p_{\bar{x}}$ 指的是 \bar{x} 处的主流道内产生的压力值; p_0 指的是滴灌管首部所对应的操作压力值; $\frac{1}{2} \rho v_0^2$ 为滴灌管入口处的动压值。

求解方程式(19), 得到任意管路相对坐标 \bar{x} 处滴灌管主流道的相对压力差:

$$\Delta P = a[1 - (1-\bar{x})^{2m}] - \frac{0.058E}{Re_0^{0.25}} [1 - (1-\bar{x})^{2.75m}] - b \left[(1-\bar{x})^{2m} \ln(1-\bar{x}) - \frac{1}{2} \bar{x}(\bar{x}-2) \right] \quad (20)$$

式中: $E = L / D_e$ 为滴灌管长度与内径之比, 称为长径比; $Re_0 = v_0 D_e / \nu$ 为滴灌管入口 Re 。

式(20)当中主要包括的待定参数具体为: a 、 b 和 m 。在滴灌管水力试验中即可明确这几个参数, 从而得到完整的沿程压力分布解。

2 材料与方法

2.1 试验材料

供试的内镶式滴灌管共有 6 种, 具体如表 1 所示。

表 1 供试滴灌管各项参数表

Table 1 General parameters of tested drip pipes

滴灌管类型	滴灌管长度 L/m	滴头间距 s/m	滴灌管外径 D/mm	滴头特性参数		滴灌管内径 D_e/mm		过流断面面积 A_e/mm^2
				流量系数 C/l	流态指数 y/l	均值	标准差	
A	6,12,18,24	0.3	16	13.91	0.605	14.59	0.496	167.164
B	6,12,18,24	0.3	12	3.253	0.544	10.62	0.262	88.579
C	6,12,18,24	0.3	8	7.346	0.596	6.97	0.083	38.141
D	6,12,18,24	0.3	16	9.647	0.512	14.02	0.158	154.316
E	36,48,60	1.2,0.6,0.3,0.15	16	6.718	0.216	13.56	0.082	144.388
F	6,12,18,24	1.2,0.6,0.3,0.15	16	4.895	0.174	13.56	0.082	144.388

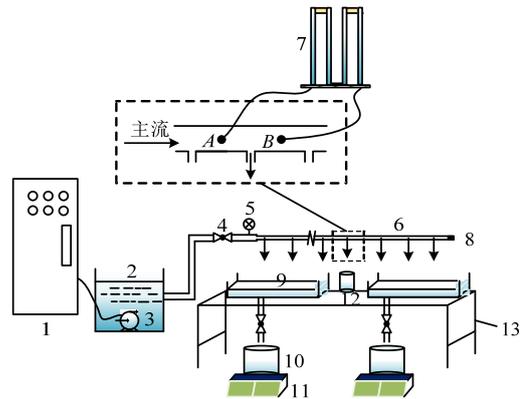
2.2 试验装置

滴灌管测压-测流试验装置及布置如图 3 所示。装置组成主要包括离心泵、滴灌管、试验台、集水槽等。试验过程中包括滴灌管类型、 s 、 L 、 H_0 , 其中 s 为滴头间距, L 为滴灌管长度, H_0 为首部压力水头。并且通过表 1 可以得知 L 、 s 以及滴灌管种类。利用恒压变频柜来对 H_0 进行设置, 主要的水平情况包括了 0.02 以及 0.04 等 6 个。通过调节变频柜设定所需的首部压力, 待水流运行平稳后, 开始测量滴灌管压力和滴头流量, 量测过程中蓄水箱内的水温维持在 20°C 左右(水的运动粘度取 $\nu = 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$)。每组工况通过更换管道设置 3 个有效重复^[25]。

之所以进行测压试验, 是为了利用回归分析获取 m 与待定的参数 a 和 b , 并验证以上压力分布模型。

k 由式(18)测得, 其中 $p_A - p_B$ 即两测点的压力差, 可通过压差计读取; 两点间的摩阻损失 $h_{f,AB} =$

$s(\lambda_A v_A^2 + \lambda_B v_B^2) / 4D_e g$, 摩阻系数 λ_A 、 λ_B 按照测点 A 、 B 点的流速代入式(7)求得。 v_A 、 v_B 则采用体积法在通水后在进行称重计算。



1.变频柜; 2.蓄水箱; 3.离心泵; 4.球阀; 5.压力表; 6.滴灌管; 7.压差计; 8.末端堵头; 9.移动式集水箱; 10.水桶; 11.称重计; 12.量杯; 13.试验台

图 3 试验布置示意图^[25]

Fig.3 Schematic diagram of test equipment

纵向流速分布利用体积法来称取集水槽的重

量, 将滴灌管 10% 长度当作间隔来设置测点, 从而获取滴灌管流速在纵向上的分布数据, 然后开展式(14)的回归分析, 从而求得 m 值。

3 结果与分析

3.1 滴灌管主流道纵向流速分布

流体在滴灌管主流道中的纵向流速分布表达式, 即对 m 进行回归运算, m 应是多因素变量。由第 1.4 节可知, 压力分布模型中已经主要包括了流动参数(管首雷诺数 Re_0)和滴灌管结构参数(长径比 E), 流速分布与 C 、 y 、 N 之间可能存在一定关系。其中 C 表示的是流量系数, y 表示的是流态指数, N 表示的是滴头共安装了数量。

对各组工况的 m 值做多因素方差分析, 影响因素可能包括了 6 种滴头种类以及 N 个滴头的个数, 通过表 1 即可发现共有 16 种水平。通过方差分析可以发现, 当显著性水平是 5% 的情况下, 滴头数量一样的时候, 种类不同的滴头的 m 无明显差异, 也就是这些滴头对应的 y 与 C 范围内, 其纵向流速的分布情况不会受到滴头种类的影响, 所以与滴头安装个数 N 呈显著的线性相关关系(如图 4), 回归得到的关系式为:

$$m = 0.0036N + 1.19, \quad 5 \leq N \leq 400 \quad (21)$$

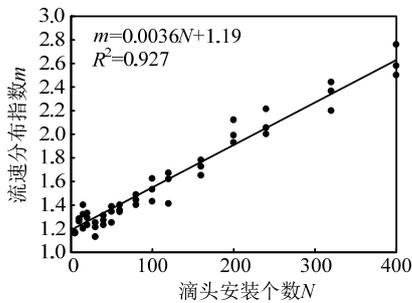


图 4 纵向流速分布指数 m 和滴头安装数 N 之间关系

Fig.4 Relationship between m and N

结合式(21)、式(14)可写为:

$$v = v_0(1 - \bar{x})^{0.0036N + 1.19} \quad (22)$$

此即基于实测数据得到的滴灌管主流道内流体的纵向流速分布表达式。

3.2 动量交换系数回归分析

由水力试验数据, 能够计算不同工况时各种管路位置所对应的动量交换系数。其中通过式(8)的假定即可得到 k 的表达式(16)的函数形式, 所以在对不同工况不同位置的 k 按式(16)在还未回归分析时, 则需要验证式(8)的假设。由图 5 可见, 滴灌管 A 在长度

为 18 m, 不同操作压力条件下, 实测得到的 k 值随滴头前后流体相对动能差 $(v_i^2 - v_{i+1}^2) / v_i^2$ 的变化关系, 通过图形可知, 二者之间线性相关关系较为明显, 其他不同滴灌管的不同工况也存在一样的规律。从而可知式(8)的假定具有一定的可靠性, 是科学合理的。

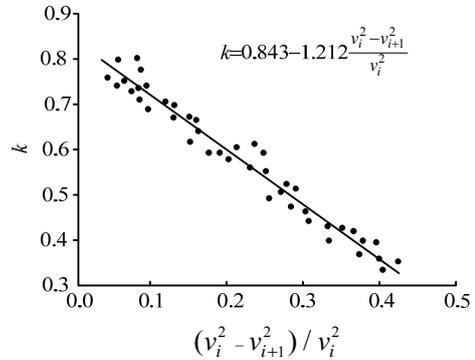


图 5 滴灌管 A 中 k 值与 $(v_i^2 - v_{i+1}^2) / v_i^2$ 的关系

Fig.5 Relationship of k and $(v_i^2 - v_{i+1}^2) / v_i^2$ in pipe A

对动量交换系数 k 按照式(16)进行回归分析, 表明不同工况下的 a_i 和 b_i 值无显著统计学差异(显著水平 0.05), 故以 a_i 和 b_i 的平均值作为 a 、 b 值, 代入式(16)结果如下:

$$k = 0.83 + 0.14 \ln(1 - \bar{x}) \quad (23)$$

图 6 所示为滴灌管主流道内流体动量交换系数 k 的沿程变化趋势。若将 k 的表达式(18)代入伯努利方程, 即可求出 $k = 0.5$, 所以通过能量方程来对变质量流动进行计算, 可视作属于特殊的一种求解方法, 此时 $k = 0.5$ 恒定, 即忽略 k 的沿程变化。因为滴灌管主流道内的流动是沿程泄流的一种变质量流动, 孔口位置肯定也会产生动量交换作用。所以对能量衡算法, 应该考虑 k , 并且其动量方程与物理实际更加符合^[25]。

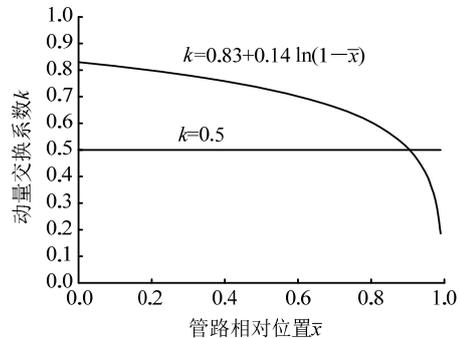


图 6 动量交换系数 k 的沿程变化

Fig.6 Axial variation of momentum exchange coefficient

3.3 沿程压力分布

根据 3.1 节、3.2 节的回归分析结果, 联立式

(20)、式(21)和式(23), 可得到滴灌管主流道内流体的沿程压力分布完整公式:

$$\Delta P = 0.83[1 - (1 - \bar{x})^{0.0072N+2.38}] - \frac{0.058E}{Re_0^{0.25}}[1 - (1 - \bar{x})^{0.01N+3.27}] - 0.14 \left[(1 - \bar{x})^{0.0072N+2.38} \ln(1 - \bar{x}) - \frac{1}{2} \bar{x}(\bar{x} - 2) \right] \quad (24)$$

通过图 7 可知, 并对比式(24)计算值, 能偶发现实测值与计算值之间具有较好的吻合度, 表明采用动量分析方法得到的式(24)用于计算滴灌管主流道流体沿程压力分布, 具有一定的精确度。

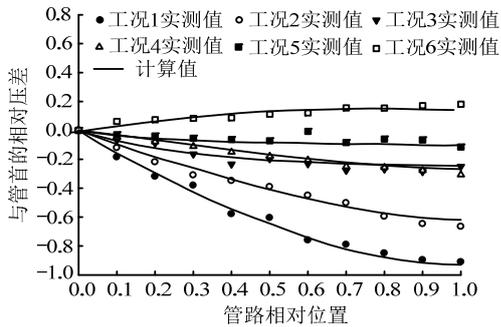


图 7 典型工况之下沿程压力分布实测和计算值之间比较
Fig.7 Comparison of longitudinal static pressure distribution between measured and calculated values

工况 6($L=6\text{ m}$, $s=1.2\text{ m}$, $H_0=0.05\text{ MPa}$)的压力分布曲线为沿程逐渐升高, 这也间接证明了变质量动量方程的合理性, 确实存在使得压力升高的动量交换作用, 而基于单位质量流体能量衡算的伯努利方程则无法体现该作用。

在滴灌系统设计时, 水力计算的最终目的之一就是确定管径与管长的最佳组合, 而在滴灌运行过程中, 首部操作压力又是系统运行费用最重要的影响因素。式(24)中包含了长径比 E 和管首雷诺数 Re_0 , 该二者作为滴灌管的结构和流动参数, 是滴灌设计和运行过程中重要的控制参数, 由于式(24)中以二者的组合形式 $E / Re_0^{0.25}$ 出现, 现分析该项对于滴灌管沿程压力分布的影响。图 8 给出了 $N=10$ ($L=6\text{ m}$, $s=0.6\text{ m}$)时, 滴灌管主流道流体的沿程压力随 $E / Re_0^{0.25}$ 的变化。

由图 8 可见, 组合参数 $E / Re_0^{0.25}$ 对压力分布的形式影响明显, 可认为 $E / Re_0^{0.25}$ 表征了摩阻作用和动量交换的相对强弱, 即 $E / Re_0^{0.25}$ 越小, 动量交换越强, 摩阻作用越弱, 表现为压力沿程增加。可以推断: 对于某个确定的管首雷诺数, 总存在一个长径比,

使得摩阻和动量交换作用基本平衡, 压力在沿程上均匀分布; 反之, 对于某个确定的长径比, 也必然存在一个管首雷诺数, 使得沿程压力均匀分布。

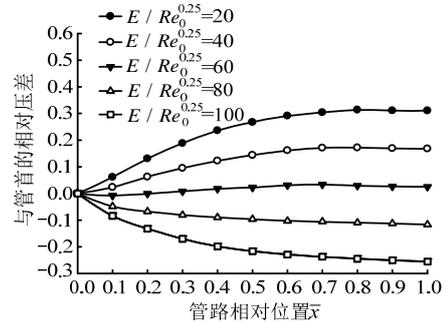


图 8 组合参数 $E / Re_0^{0.25}$ 对滴灌管沿程压力分布的影响
Fig.8 Relationship between $E / Re_0^{0.25}$ and longitudinal static pressure distribution

4 结 论

以动量守恒定理为计算依据, 根据滴灌管的主流道变质量流动特征, 构建动量方程, 同时按照室内水力的测试数据, 得到了滴灌管主流道中流体的沿程压力分析解。此次研究的结论如下:

(1) 分析变质量流动的水力计算为何不能采用能量衡算公式, 同时利用动量守恒方程构建变质量流动的数学模型, 通过分析可以得知: 滴灌管等变质量流动产生的流体压力受到流体动量交换作用和管壁摩阻作用两个部分决定, 其中摩阻作用使得压力趋于降低, 动量交换作用使压力趋于升高 沿程压力分布取决于两者的相对强弱。

(2) 将滴灌管主流道内流体的纵向流速归为指数分布, 并对流速分布指数 m 进行了多因素方差分析, 结果表明 m 与滴头种类无关, 而与滴头安装个数 N 呈显著的线性相关。

(3) 分析了动量交换系数 k 的函数形式, 并且以测流试验数据为基础进行回归分析, 计算出滴灌管主流道动量交换系数的经验公式; λ 计算所得 Blasius 公式相结合, 求解动量方程获得了滴灌管主流道流体的沿程压力分布解。

(4) 压力分布模型中, 将摩阻和动量交换作用归化为可控的结构参数 E 和流动参数 Re_0 , 便于优化滴灌系统的结构设计和确定最佳运行工况。

滴灌技术虽已得到广泛应用, 但目前对于滴灌系统管路中的流动特性研究还很不充分, 相关水力计算也多是机械地套用陈旧方法, 而不对其适用性作确证研究, 制约了滴灌技术的发展。本文为滴灌

水力计算提供了一种新的思路, 今后的工作应深入对滴头微流道内复杂流动机制的研究, 进一步完善滴灌管路的水动力学模型, 使压力分布的计算结果更加实用与准确, 进而在设计和运行滴灌管网过程中提供可靠依据。

参考文献:

- [1] Baiamonte G. Advances in designing drip irrigation laterals [J]. *Agricultural Water Management*, 2018, 199: 157—174.
- [2] Reinders F B, Niekerk A S V. Technology smart approach to keep drip irrigation systems functional [J]. *Irrigation & Drainage*, 2018, 67(1): 82—88.
- [3] Stoochnoff J A, Graham T, Dixon M A. Drip irrigation scheduling for container grown trees based on plant water status [J]. *Irrigation Science*, 2018, 36(2): 1—8.
- [4] Francisco Alcon, María Dolores de-Miguel, Michael Burton. Duration analysis of adoption of drip irrigation technology in southeastern Spain [J]. *Technological Forecasting and Social Change*, 2011, 78(6): 991—1001.
- [5] 张国祥, 吴普特. 滴灌系统滴头设计水头的取值依据 [J]. *农业工程学报*, 2005, 21(9): 20—22.
Zhang Guoxiang, Wu Pute. Determination of the design working head of emitter [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2005, 21(9): 20—22. (in Chinese)
- [6] Wu I P, Gitlin H M. Design of irrigation lines [J]. *Technical Bulletin of the University of Hawaii*, 1974a, 96(1): 3—29.
- [7] Wu I P, Gitlin H M. Drip irrigation design based on uniformity [J]. *Transactions of the ASAE*, 1974b, 17(3): 429—432.
- [8] Wu I P. A uni-plot for drip irrigation lateral and submain design [J]. *Transactions of the ASAE*, 1985, 28(2): 522—528.
- [9] Jain S K, Singh K K, Singh R P, et al. Micro-irrigation lateral design using lateral discharge equation [J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2002, 128(2): 125—128.
- [10] Kang Y. H., Nishiyama A. S. Design of micro-irrigation sub-main units [J]. *ASCE. Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 1996, 122(2): 83—89.
- [11] Kang Y H, Nishiyama S. Hydraulic analysis of microirrigation submain units [J]. *Transactions of the ASAE*, 1995, 38(5): 1377—1384.
- [12] Kang Y H, Nishiyama S. A simplified method for design of microirrigation laterals [J]. *Transactions of the ASAE*, 1996d, 39(5): 1681—1687.
- [13] Demir V, Yurdem H, Degirmencioglu A, et al. Development of prediction models for friction losses in drip irrigation laterals equipped with integrated in-line and on-line emitters using dimensional analysis [J]. *Bio-systems Engineering*, 2007, 96(4): 617—631.
- [14] Wang Y, Zhu D, Lin Z. Dimensional analysis for estimating the local head losses in trickle laterals equipped with integrated in-line emitters [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2015, 46(5): 602—611.
- [15] Gomes A W A, Frizzone J A, Rettore Neto O, et al. Local head losses for integrated drippers in polyethylene pipes [J]. *Engenharia Agrícola*, 2010, 30(3): 435—446.
- [16] Zitterell D B, Frizzone J A, Neto O R. Dimensional analysis approach to estimate local head losses in microirrigation connectors [J]. *Irrigation Science*, 2014, 32(3): 169—179.
- [17] Zitterell D B, Frizzone J A, Neto O R. Dimensional analysis approach to estimate local head losses in microirrigation connectors [J]. *Irrigation Science*, 2014, 32(3): 169—179.
- [18] Sadeghi S H, Peters R T, Lamm F R. Design of Zero Slope Microirrigation Laterals: Effect of the Friction Factor Variation [J]. *Journal of Irrigation & Drainage Engineering*, 2015, 141(10): 04015012.
- [19] 王新坤. 基于二分法的微灌毛管水力设计 [J]. *排灌机械工程学报*, 2007, 25(6): 27—30.
Wang Xinkun. Hydraulic design of micro-irrigation laterals based on bisection method [J]. *Drainage and Irrigation Machinery*, 2007, 25(6): 27—30. (in Chinese)
- [20] 白丹, 王新. 基于遗传算法的多孔变径管优化设计 [J]. *农业工程学报*, 2005, 21(2): 42—45.
Bai Dan, Wang Xin. Optimum design for tapered diameter pipeline with multiple outlets based on genetic algorithm [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2005, 21(2): 42—45. (in Chinese)
- [21] Martí P, Provenzano G, Royuela Á, et al. Integrated emitter local loss prediction using artificial neural networks [J]. *Journal of Irrigation & Drainage Engineering*, 2010, 136(1): 11—22.
- [22] Provenzano G, Dio P D, Salvador G P. New computational fluid dynamic procedure to estimate friction and local losses in coextruded drip laterals [J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2007, 133(6): 520—527.
- [23] 王福军, 王文娥. 滴头流道 CFD 分析的研究进展与问题 [J]. *农业工程学报*, 2006, 22(7): 188—192.
Wang Fjun, Wang Wen'e. Research progress in analysis of flow passage in irrigation emitters using computational fluid dynamics techniques [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2006, 22(7): 188—192. (in Chinese)
- [24] 王新坤, 许文博, 赵坤, 等. 基于 CFD 的多孔管热风数值模拟与设计方法 [J]. *排灌机械工程学报*, 2011, 29(1): 82—86.
Wang Xinkun, Xu Wenbo, Zhao Kun, et al. Numerical

- simulation and design method of hot air for porous pipe based on CFD [J]. *Drainage and Irrigation Machinery*, 2011, 29(1): 82–86. (in Chinese)
- [25] 丁法龙, 茅泽育, 王文娥, 等. 滴灌管主流道沿程压力分布模型及验证[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(3): 117–124.
Ding Falong, Mao Zeyu, Wang Wen'e, et al. Modelling and verification of pressure distribution along mainstream in drip irrigation pipe [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(3): 117–124. (in Chinese)
- [26] McNowen J S. Mechanics of manifold flow [J]. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 1954, 119(7): 1103–1118.
- [27] 杜涛, 刘焕芳, 金瑾. 沿程出流多孔流体分布管压力分布特性[J]. *化学工程*, 2014, 42(9): 48–52.
Du Tao, Liu Huanfang, Jin Jin. Pressure distribution characteristics of perforated pipe outflow along pipeline [J]. *Chemical Engineering (China)*, 2014, 42(9): 48–52. (in Chinese)
- [28] Bagarello V, Ferro V, Provenzano G, et al. Evaluating pressure losses in drip-irrigation lines [J]. *Journal of Irrigation & Drainage Engineering*, 1997, 123(1): 1–7.
- [29] Pumo D, Provenzano G. Experimental Analysis of Local Pressure Losses for Microirrigation Laterals [J]. *Journal of Irrigation & Drainage Engineering*, 2004, 130(4): 318–324.

(上接第 240 页)

- [11] 杨震琦, 庞宝君, 王立闻, 等. JH-2 模型及其在 Al_2O_3 陶瓷低速撞击数值模拟中的应用[J]. *爆炸与冲击*, 2010, 30(5): 463–471.
Yang Zhenqi, Pang Baojun, Wang Liwei, et al. JH-2 model and its application in low-speed impact numerical simulation of Al_2O_3 ceramics [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2010, 30(5): 463–471. (in Chinese)
- [12] 周维垣, 剡公瑞, 杨若琼. 岩体弹脆性损伤本构模型及工程应用[J]. *岩土工程学报*, 1998, 20(5): 54–57.
Zhou Weiyuan, Yan Gongrui, Yang Ruoqiong. Elasto-brittle damage model for rock mass based on field tests in Laxiwa arch dam site [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1998, 20(5): 54–57. (in Chinese)
- [13] 白卫峰, 刘霖艾, 管俊峰, 等. 基于统计损伤理论的硫酸盐侵蚀混凝土本构模型研究[J]. *工程力学*, 2019, 36(2): 66–77.
Bai weifeng, Liu Linai, Guan Junfeng, et al. The constitutive model of concrete subjected to sulfate attack based on statistical damage theory [J]. *Engineering Mechanics*, 2019, 36(2): 66–77. (in Chinese)
- [14] 余志武, 单智. 混凝土随机损伤本构模型研究新进展[J]. *工程力学*, 2018, 35(8): 1–13.
Yu Zhiwu, Shan Zhi. Advances in researches on stochastic damage models of concrete [J]. *Engineering Mechanics*, 2018, 35(8): 1–13. (in Chinese)
- [15] 蔡灿, 伍开松, 袁晓红, 等. 中低应变率下的岩石损伤本构模型研究[J]. *岩土力学*, 2015, 36(3): 795–802.
Cai Can, Wu Kaisong, Yuan Xiaohong, et al. Damage constitutive model of rock under medium and low strain rates [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(3): 795–802. (in Chinese)
- [16] 张建国, 刘勇, 王延刚. 高速切削过程材料变形的应变率研究[J]. *航空学报*, 2018, 39(3): 1–7.
Zhang Keguo, Liu Yong, Wang Yangang. Strain rate on texture deformation in high speed metal cutting process [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2018, 39(3): 1–7. (in Chinese)
- [17] 盖立武, 郭旭红, 沈翔宇, 等. Tialn 涂层刀具干铣氟金云母陶瓷切削力试验研究[J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2017, 11: 141–144.
Gai Liwu, Guo Xuhong, Shen Xiangyu, et al. Experimental study on cutting force of fluorophlogite ceramics with Tialn coated tool [J]. *Modular Machine & Automatic Manufacturing Technique*, 2017, 11: 141–144. (in Chinese)
- [18] Zhang Z F, Eckert J, Schulzt L. Difference in compressive and tensile fracture mechanisms of $Zr_{59}Cu_{20}Al_{10}Ni_8Ti_3$ bulk metallic glass [J]. *Acta Materialia*, 2003, 51(4): 1167–1179.
- [19] Greer A L, Cheng Y Q, Ma E. Shear bands in metallic glasses[J]. *Materials Science and Engineering R*, 2013, 74(4): 71–132.
- [20] 冯小伟, 李俊承, 常敬臻, 等. 氧化铝陶瓷受冲击破坏的微观机理研究[J]. *兵工学报*, 2017, 38(12): 2472–2479.
Feng Xiaowei, Li Chengjun, Chang Jingzhen, et al. Study on impact damage mechanism of alumina ceramics [J]. *Acta Armamentaria*, 2017, 38(12): 2472–2479. (in Chinese)