



内镶嵌片式滴灌带局部水头损失试验研究

王剑*, 魏涛, 杨婷, 袁寿其

(江苏大学国家水泵及系统工程技术研究中心, 江苏 镇江 212013)



王剑

摘要:通过试验研究了标准管径 16 mm 的 5 种内镶嵌片式滴灌带的局部水头损失, 分析了滴灌带局部水头损失占沿程水头损失的比值 h_j/h_f 和局部水头损失系数 α 的变化规律。结果表明: 相同工作压力下, 滴灌带当量直径随壁厚的增大而减小, 造成沿程水头损失和局部水头损失的增大, 局部水头损失与壁厚、滴头断面面积和雷诺数有关。随着雷诺数的增大, 滴灌带局部水头损失占沿程水头损失的比值 h_j/h_f 减小, 最小值可达到 0.67, 但仍超过中国制定的微灌工程技术规范设计标准(0.1~0.2)。通过对试验数据进行多元回归分析, 提出了滴灌带局部水头损失系数与过水断面收缩比和雷诺数的关系式, 相关系数为 0.96。

关键词:滴灌; 滴灌带; 局部水头损失; 局部水头损失系数

中图分类号: S275.6 **文献标志码:** A **文章标号:** 1674-8530(2019)12-1100-05

Doi: 10.3969/j.issn.1674-8530.19.0200 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



王剑, 魏涛, 杨婷, 等。内镶嵌片式滴灌带局部水头损失试验研究[J]. 排灌机械工程学报, 2019, 37(12):1100-1104.

WANG Jian, WEI Tao, YANG Ting, et al. Experimental study on local head loss in thin-wall drip irrigation pipes with non-coaxial emitters[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering (JDIME), 2019, 37(12):1100-1104. (in Chinese)

Experimental study on local head loss in thin-wall drip irrigation pipes with non-coaxial emitters

WANG Jian*, WEI Tao, YANG Ting, YUAN Shouqi

(National Research Center of Pumps, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

Abstract: The local head loss of non-coaxial emitters in five thin-wall drip irrigation pipes with standard diameter of 16 mm was studied by conducting hydrodynamic experiment. The variation of the ratio of local head loss to friction head loss along the drip irrigation pipe, h_j/h_f , and the local head loss coefficient α , were analyzed. The results show that under the same working pressure, the equivalent diameter of drip irrigation pipe decreases with the increase of wall thickness, resulting in the increase of friction head loss and local head loss along the drip irrigation pipe. The local head loss is related to wall thickness, emitter cross section area and Reynolds number. With the increase of Reynolds number, the ratio of local head loss to friction head loss along the drip irrigation pipe (h_j/h_f) decreases. The minimum value reaches 0.67, but it still exceeds the design standard of China's technical specification for micro-irrigation engineering (0.1~0.2). Based on the multiple regression analysis of the test data, the relationship between the local head loss coefficient and the contraction ratio of cross section and Reynolds number is proposed, and the correlation coefficient is 0.96.

Key words: drip irrigation; drip irrigation pipe; local head loss; local head loss coefficient

收稿日期: 2019-08-05; 修回日期: 2019-09-16; 网络出版时间: 2019-12-07

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20191206.1311.006.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51709130); 中国博士后科学基金资助项目(2017M621653)

第一作者简介: 王剑(1986—), 男, 山东东营人, 助理研究员, 博士(通信作者, wangjian@163.com), 主要从事节水灌溉新技术研究。

第二作者简介: 魏涛(1995—), 男, 贵州铜仁人, 硕士研究生(4764676167@qq.com), 主要从事节水灌溉新技术研究。

滴灌是目前最有效的灌溉方式之一,滴灌带(管)是指在制造过程中,在管道上加工有滴头或其他出流装置进而使之兼具配水和滴水功能的塑料带(管).一般情况下,当滴灌带(管)的壁厚较厚、在自然状态下仍呈管状的称为滴灌管;壁厚较薄、在自然状态下呈带状或卷盘压扁后呈带状的称为滴灌带^[1].

滴头局部水头损失影响灌水均匀度和滴灌管网设计,前人对滴灌系统局部水头损失已进行了大量的研究.仇振杰等^[2]研究表明插入式滴头局部水头损失系数与滴头间距、雷诺数有关,并提出了插入式滴头的局部水头损失系数计算公式.王剑等^[3]研究表明局部水头损失系数由滴头断面面积和毛管断面面积之比决定.王亚林等^[4]用数值模拟和量纲分析法研究了内镶圆柱式滴灌管局部水头损失.上述研究主要针对滴灌管的局部水头损失,然而滴灌带的壁厚较薄,多在0.15~0.80 mm^[5],随着压力的变化,滴灌带的几何形状也会发生变化.此外,内镶贴片式滴头与插入式及圆柱式滴头的几何结构不同,管道局部过水断面受到滴头尺寸和形变程度共同影响,水流边界条件不同,涡流湍动规律和机械能消耗的机理发生变化,因此传统水头损失计算方法并不适用于贴片式滴灌带.

已有学者认识到了此问题并开展了相关研究.丛佩娟^[6]指出薄壁滴灌带内流量随压缩度的增大而减小.RETTORE等^[7]认为PE(聚乙烯)管道直径受内部压力的影响而改变,推导出变直径圆锥状管道内沿程水头损失计算方法.PROVENZANO等^[8]分析了管道弹性形变对过水断面和沿程水头损失的影响,对Darcy-Weisbach公式中的摩擦阻力系数进行了修正.可见,现有研究多集中在沿程水头损失的计算方法,对内镶贴片式滴灌带局部水头损失的研究较为缺乏,尤其需要提出能够准确计算且适用于工程设计的公式.

因此,文中选取市场上常见的几种16 mm滴灌带,分析不同壁厚、不同滴头尺寸的内镶贴片式滴灌带在不同工作压力下过水断面变化及能量损失规律,为更准确地计算水头损失和设计滴灌系统提供参考.

1 材料与方法

1.1 试验材料

为了确定管道尺寸(高度和宽度)与压力之间的关系,对公称直径为16 mm、4种不同滴头的5根薄壁滴灌带进行动水试验.滴灌带分别编号为A,B,C,D,E,每种滴灌带各截取3个滴头,采用游标卡尺(精度为0.01 mm)测量滴灌带的几何尺寸和滴头尺寸,求其平均值.滴灌带的具体形状和参数见图1和表1,其中 A_1 表示滴头断面面积, A_2 表示滴灌带横截面积, e 表示壁厚, a 表示滴头宽度, b 表示滴头高度, c 表示滴头长度, D 为内径, l 为滴头间距.

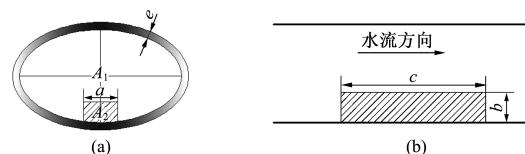


图1 几何变量示意图
Fig.1 Schematic of geometric variables

表1 滴灌带几何结构特征参数

Tab.1 Characteristics of measured thin-wall drip irrigation pipes

| 编号 | D/mm | e/mm | a/mm | b/mm | c/mm | A_1/mm^2 | l/cm | 生产厂家 |
|----|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|-------------------|---------------|----------|
| A | 16 | 0.20 | 5.42 | 1.90 | 18.59 | 10.85 | 30 | 欧灌,希腊 |
| B | 16 | 0.46 | 8.37 | 2.03 | 30.08 | 19.32 | 30 | 欧灌,希腊 |
| C | 16 | 0.38 | 8.21 | 2.08 | 29.97 | 19.32 | 30 | 欧灌,希腊 |
| D | 16 | 0.38 | 9.79 | 5.34 | 39.11 | 52.33 | 40 | 欧灌,希腊 |
| E | 16 | 0.64 | 10.36 | 5.76 | 21.15 | 60.84 | 40 | 耐特菲姆,以色列 |

1.2 试验装置与方法

试验在江苏大学流体机械工程技术研究中心的喷灌大厅内进行.试验装置由水箱、离心泵(工作压力0~400 kPa)、球阀、电子压力表(量程0~400 kPa,精度1 kPa)、过滤器、滴灌带和滴头、游标卡尺、电子秤(精度2 g)、秒表、水平仪、温度计等组成.滴灌带的首尾两端分别接电子压力表,首部压力表前接过滤器,滴灌带长10 m.试验选用5根不同的滴灌带,每次测量设计12组工作压力水头(末端接压力表),范围为5~16 m,间隔1 m;使用水平仪调平,使压力表与滴灌带均处于同一水平线上,试验装置如图2所示.试验时,接通电源使离心泵为系统提供压力,滴灌带末端自由出流,通过改变首尾部球阀开度控制流量,进而改变滴灌带内的流速和压力;待压力稳定后,记录首尾压力表的数据,并在出水口处用称重法(测量3次,测量时间为30 s,取3次平均值)测定流量.用游标卡尺在距进水口2.5,7.5 m处测量滴灌带的垂直管径和水平管径,重复3次取其平均值.

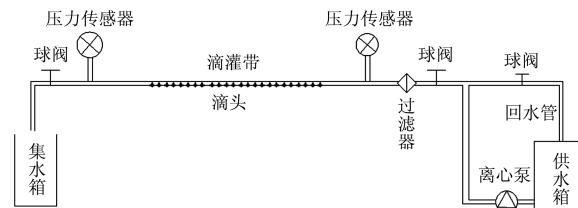


图2 试验装置示意图
Fig.2 Sketch of experimental setup

1.3 水头损失计算方法

在滴灌管网水力计算时,对滴灌带沿程水头损失计算主要利用 Darcy-Weisbach 公式^[9],即

$$h_f = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g}, \quad (1)$$

式中: h_f 为滴灌带沿程水头损失,m; f 为沿程阻力系数; D 为滴灌带内径,m; L 为滴灌带长度,m; v 为滴灌带水流流速,m/s; g 为重力加速度,m/s².

当 $4000 < Re < 100000$ 时,流体处于紊流范围内,沿程阻力系数 f 主要采用 Blasius 公式计算,即

$$f = \frac{c}{Re^{0.25}}, \quad (2)$$

式中: c 为常数,对于小管径的 PE 管,可以假定为 0.302^[10].

当压力较小时,滴灌带呈扁平状;随着压力的增大,水平内径变小,垂直内径变大,过水断面趋近于圆形.对于过水断面为非圆形的滴灌带,需要通过当量直径来计算沿程水头损失,式(1)中的 D 等于非圆形断面水力半径 R_h 的 4 倍,计算公式为

$$D = 4R_h = 4 \frac{A}{P}, \quad (3)$$

式中: A 为非圆形断面的面积,m²; P 为非圆形断面的周长,m.

如图 3 所示,对于滴灌带的非圆形的过水断面,在低压工作下,其横截面大小等于半径为 r 的两段圆弧的 2 倍^[8],即

$$A = r^2(\omega - \sin \omega), \quad (4)$$

$$P = 2\omega r, \quad (5)$$

式中: w 为圆弧的中心角, A 为总面积, P 为总周长.

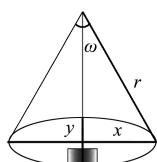


图 3 滴灌带截面变化

Fig.3 Variation of cross-section of drip irrigation pipe

滴灌带单个滴头的局部水头损失 h_j 可通过试验数据得到,计算公式为

$$h_j = \frac{h - h_f}{n}, \quad (6)$$

式中: h 为总水头损失,m; n 为滴头个数.

滴灌带内滴头造成的局部水头损失计算公式为

$$h_j = \alpha \frac{v^2}{2g}, \quad (7)$$

式中: α 为局部水头损失系数,又称局部阻力系数.

2 结果与分析

2.1 滴灌带沿程水头损失

滴灌带属于沿程泄流管道,由于滴灌带的滴头流量较小,其末端与首端流量总体差距不大,所以管道内各段流速和雷诺数可近似认为一致.对于 5 根滴灌带,虽然其公称直径均为 16 mm,但滴灌带的过水断面和当量直径各不相同.图 4 为沿程水头损失,从图中可知,E 管的壁厚最大,为 0.64 mm,相同压力下横向直径大于纵向直径,对应的当量直径最小,其所造成的沿程水头损失也最大.反之,A 管的壁厚最小,为 0.20 mm,其造成的沿程水头损失也最小.

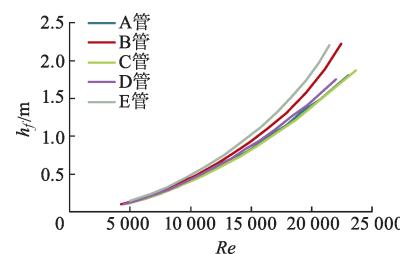


图 4 沿程水头损失对比

Fig.4 Comparison of friction head loss along drip irrigation pipe

2.2 滴灌带局部水头损失

根据试验实测总水头损失和通过式(1)计算的沿程水头损失,可以得到局部水头损失.表 2 给出了 5 根滴灌带的总水头损失 h 、横向直径 x 、纵向直径 y 和总局部水头损失 h_j 占沿程水头损失 h_f 的比值等试验结果.从表中可以看出,壁厚为 0.2 mm 的 A 管的横向直径 x 与纵向直径 y 在工作压力范围 5~16 m 内,变化仅为 0.13 和 0.53 mm,过水断面当量直径 D 最接近厂家给定的公称直径.而壁厚为 0.64 mm 的 E 管的横向管径 x 和纵向管径 y 在工作压力范围内变化较大,当压力达到最大时,过水断面仍近似为椭圆形.

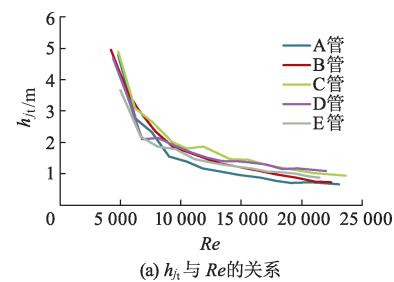
图 5 给出了 5 根滴灌带的总局部水头损失占沿程水头损失的比值 h_j/h_f 和总局部水头损失 h_j 随雷诺数 Re 的变化关系.由图可知:随着雷诺数的增大,滴灌带总局部水头损失占沿程水头损失的比值 h_j/h_f 逐渐减小,最小值可达到 0.67.滴灌带总局部水头损失 h_j 逐渐增大,最大值可达到 1.95 m.因此,若按照微灌工程技术规范规定的毛管局部水头损失取

沿程水头损失 10%~20% 进行估算,在实际工程运

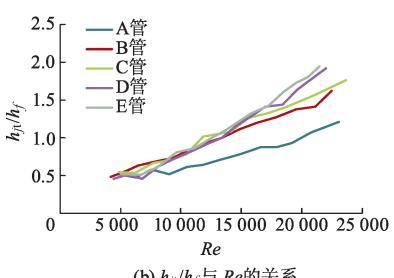
用中会造成很大的偏差.

表 2 实测局部水头损失结果对比
Tab.2 Comparison of measured local head loss

| 编号 | Re | h/m | x/mm | y/mm | D/mm | h_f/m | h_j/m | h_j/h_f |
|----|--------------|-----------|-------------|-------------|-------------|-----------|-----------|-----------|
| A | 4 819~23 068 | 0.61~3.02 | 16.18~16.05 | 15.52~16.05 | 15.75~16.04 | 0.11~1.81 | 0.52~1.21 | 0.67~4.78 |
| B | 4 220~22 451 | 0.58~3.84 | 18.08~16.25 | 13.03~15.08 | 14.48~15.48 | 0.10~2.22 | 0.48~1.62 | 0.73~4.96 |
| C | 4 829~23 641 | 0.66~3.63 | 16.65~16.17 | 15.37~15.87 | 15.80~16.00 | 0.11~1.87 | 0.55~1.76 | 0.95~4.88 |
| D | 4 413~22 006 | 0.56~3.68 | 16.79~15.94 | 14.76~15.60 | 15.44~15.72 | 0.10~1.76 | 0.46~1.92 | 1.09~4.67 |
| E | 4 998~21 487 | 0.66~4.15 | 17.55~16.01 | 12.76~14.60 | 14.14~15.08 | 0.14~2.20 | 0.52~1.95 | 0.88~3.65 |



(a) h_j 与 Re 的关系



(b) h_j/h_f 与 Re 的关系

图 5 滴灌带局部水头损失占沿程水头损失之比、总局部水头损失与雷诺数的关系

Fig.5 Relationship between ratio of local head loss to friction head loss, total local head loss and Reynolds number

图 6 给出了单个滴头局部水头损失 h_j 随雷诺数 Re 的变化规律.当雷诺数较小时,5 根滴灌带的滴头局部水头损失相差不大,为 0.01~0.02 m.随着雷诺数的增大,局部水头损失逐渐增大且不同处理间的差异也增大;当 $Re>20 000$ 时,E 管的滴头断面面积最大,其单个滴头造成的局部水头损失 h_j 可达到 0.07~0.08 m,而 A 管的局部水头损失 h_j 仅达到 0.02~0.03 m.滴灌带 C 和 D 壁厚相同,而由于较大的滴头体积和断面面积,D 管的局部水头损失明显大于 C 管.滴灌带 B 和 C 的滴头尺寸基本相同,由于 B 管壁厚较大,当 $Re<12 000$ 时,其局部水头损失略大于 C 管,随后基本相等.由此可见,内镶嵌片式滴灌带的局部水头损失由滴头尺寸、壁厚和雷诺数共同决定,相同雷诺数下,局部水头损失随着滴头断面面积和壁厚的增大而增大,且滴头断面面积对局部水头损失的影响大于壁厚的影响.

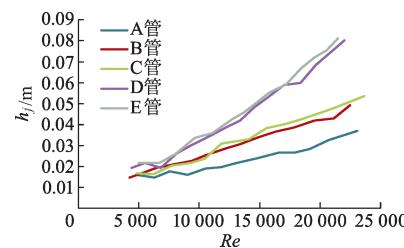


图 6 单个滴头局部水头损失与雷诺数的关系

Fig.6 Relationship between local head loss of a single dripper and Reynolds number

2.3 滴灌带局部水头损失系数

图 7 为局部水头损失系数 α 与雷诺数之间的关系.5 根滴灌带局部水头损失系数均随着雷诺数的增大而减小,随后趋于稳定.不同滴灌带的局部水头损失不同:对于滴头和壁厚较小的 A 管,其局部水头损失系数维持在 0.3 以上;对于滴头和壁厚较大的 E 管,其局部水头损失系数维持在 0.7 以上.

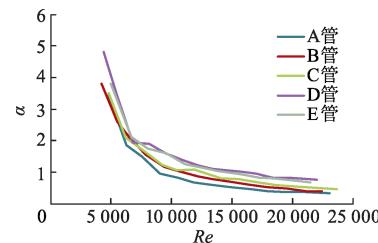


图 7 局部水头损失系数与雷诺数的关系

Fig.7 Relationship between local head loss coefficient and Reynolds number

由于滴灌带局部水头损失与过水断面形变、滴头断面面积和雷诺数有关,因此定义过水断面收缩比即滴头断面面积与滴灌带过水断面面积比值,并拟合公式.通过 SigmaPlot 软件进行多元回归分析,结果见表 3,收缩比 A_1/A_2 和雷诺数的显著性概率值均小于 0.001,表明其对滴灌带局部损失系数的影响在 0.001 水平上具有统计学意义.局部水头损失系数计算公式为

$$\alpha = 556 498.73 \left(\frac{A_1}{A_2} \right)^{0.189} Re^{-1.369}, \quad (8)$$

式中: A_1 为滴头断面面积; A_2 为滴灌带断面面积.

表3 局部水头损失系数多元回归分析结果
Tab.3 Multiple regression analysis results of local head loss coefficient

| 因素 | 系数 | σ | t | P |
|---------------|------------|----------|-----------|----------|
| 常数 | 556 498.73 | 0.774 1 | 3.173 0 | 0.002 3 |
| $\ln A_1/A_2$ | 0.189 0 | 0.021 7 | 8.696 1 | <0.000 1 |
| $\ln Re$ | -1.369 0 | 0.035 4 | -38.677 4 | <0.000 1 |

式(8)的相关系数 $R^2 = 0.96$, 表明拟合公式相关性较高. 图8给出了局部损失实测值 α_1 与式(8)计算值 α_2 的对比结果. 由图可知, 计算值与实测值略有偏差, 但趋势吻合度较好.

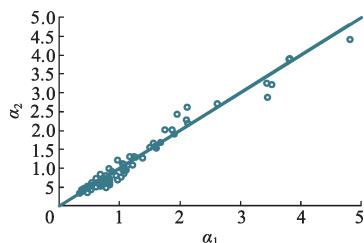


图8 局部水头损失系数计算值与实测值对比
Fig.8 Comparison between measured and estimated local head loss coefficient

3 结论

1) 相同工作压力下, 滴灌带壁厚越大, 其过水断面和当量直径越小, 造成沿程水头损失和局部水头损失的增大, 滴灌带局部水头损失与壁厚、滴头尺寸和雷诺数有关.

2) 滴灌带局部水头损失系数与过水断面收缩比、雷诺数有关, 且随着收缩比增大而增大, 随雷诺数增大而减小. 通过回归分析得到了滴灌带局部水头损失系数的计算公式.

3) 滴灌带正常工作状态下的过水断面和当量直径小于传统滴灌管, 局部水头损失占沿程水头损失的比值 h_n/h_f 大于微灌工程技术规范设计标准, 在滴灌设计时, 可采用式(7)和(8)估算滴灌带局部水头损失.

参考文献(References)

[1] 陈瑞, 朱德兰, 吴守军, 等. 涌泉根灌灌水器外壳材料对水力性能的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2019, 37(4): 358-362.

CHEN Rui, ZHU Delan, WU Shoujun, et al. Effects of shell material characteristics on hydraulic performance of

bubbled-root emitter[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering, 2019, 37(4): 358-362. (in Chinese)

[2] 仇振杰, 朱德兰, 张林. 滴头插入对滴灌毛管水头损失影响试验研究[J]. 排灌机械工程学报, 2013, 31(3): 265-269.

QIU Zhenjie, ZHU Delan, ZHANG Lin. Experimental study on effect of on-line emitter on head loss in drip irrigation laterals[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering, 2013, 31(3): 265-269. (in Chinese)

[3] 王剑, 朱德兰, 李岚斌, 等. 滴灌毛管局部水头损失计算方法研究[J]. 节水灌溉, 2011(12): 16-18.

WANG Jian, ZHU Delan, LI Lanbin, et al. Study on calculation method of lateral local head loss with insertion emitter[J]. Water saving irrigation, 2011(12): 16-18. (in Chinese)

[4] 王亚林, 朱德兰, 张林. 基于量纲分析的内镶圆柱式毛管局部水头损失研究[J]. 水利学报, 2015, 46(5): 102-111.

WANG Yalin, ZHU Delan, ZHANG Lin. 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): 102-111. (in Chinese)

[5] THOMPSON E, MERKLEY G, KELLER A, et al. Experimental determination of the hydraulic properties of low-pressure, lay-flat drip irrigation systems[J]. Journal of irrigation and drainage engineering, 2011, 137(1): 37-48.

[6] 丛佩娟. 地下滴灌管网水力特性研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2004.

[7] RETTORE N O, BOTREL T, FRIZZONE J, et al. Method for determining friction head loss along elastic pipes[J]. Irrigation science, 2014, 32(5): 329-339.

[8] PROVENZANO G, GIUSEPPER, ALAGNAV, et al. Analysis of geometrical relationships and friction losses in small-diameter lay-flat polyethylene pipes[J]. Journal of irrigation and drainage engineering, 2016, 142(2): 04015041-1.

[9] 吴持恭. 水力学(上册)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2008: 119-154.

[10] BAGARELLO V, FERRO V, PROVENZANO G, et al. Evaluating pressure losses in drip-irrigation lines[J]. Journal of irrigation and drainage engineering, 1997, 123(1): 1-7.

(责任编辑 徐云峰)