

对微灌滴头水流流态若干问题的思考及补偿机理的探索

张国祥, 丁苏疆

(新疆泓科节水设备制造有限公司, 乌鲁木齐 830000)

摘要: 滴头水力计算对于管道工程设计是十分重要的。该文研究了压管道水流流态划分的依据与水流条件、滴头工作水头与管流沿程损失水头的区别, 及滴头流量的水温修正。并对无弹性件滴头流态指数 $x < 0.5$ 的现象, 作了机理探讨, 提出了“面积补偿”法。结果表明: 1) 将尼古拉兹水力实验成果为依据的有压管流流态套用于滴头水力计算中(除微管滴头外)是错误的; 2) 认为对流态指数 $x=1$ 的滴头, 按层流流态对滴头流量做水温修正是正确的; 对 $x \leq 0.5$ 的滴头, 不需做流量的水温修正, 原因在于流道内基本上全为局部损失, 而不是滴头流态为紊流阻力平方区; 对 $1 > x > 0.5$ 的滴头, 目前可不做水温修正, 可在滴头水力试验中使用设计温度的水, 获取符合水温要求的水力关系。3) 对于滴头流态区分, 仅对已基本淘汰的微管滴头有必要, 对其余滴头并无实际需要, 应于放弃。4) 无弹性件滴头 $x < 0.5$ 的现象机理是“面积补偿”, 即过流面积随水头增大而减小, 原因是流道边界的急剧变化和流道惯性与水头(流速)正相关。

关键词: 灌溉, 水力学, 流量, 补偿, 微灌滴头, 流态, 水温修正, 无弹性件

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.01.015

中图分类号: S275.6

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2012)-01-0078-04

张国祥, 丁苏疆. 对微灌滴头水流流态若干问题的思考及补偿机理的探索[J]. 农业工程学报, 2012, 28(1): 78-81.
Zhang Guoxiang, Ding Sujiang. Some problems of water flow pattern and compensation mechanism for micro-irrigation emitters[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(1): 78-81. (in Chinese with English abstract)

0 引言

早期文献^[1-2]在论述微灌滴头的水力特性时, 将尼古拉兹实验成果作为理论依据。近年又看到有文章^[3]在讨论微灌滴头的流态时, 结论之一为: “六种迷宫式流道灌水器内部流体流动的(雷诺数) $R_e=105\sim 930$, 流态转换的临界雷诺数比常规尺度流道的值要小, 低于 255”; 文献^[4]也以同样的依据来划分滴头的流态。由此看来, 有必要对滴头的流态与以尼古拉兹实验成果划分的水流流态, 做进一步的分析、比较与思考; 分清异同, 以便走出早已陷入的误区。同时, 因受管流流态概念的影响, 对近年出现的滴头(无弹性件)流态指数 $x < 0.5$ 的现象, 难以理解, 也需对其机理做一探索。

1 以尼古拉兹管流实验成果为依据的流态划分

众所周知, 1933 年尼古拉兹(Nikuradse)对内壁用人工沙粒粗糙的圆管进行了广泛且深入的水力实验, 并将成果点绘在以 $\lg R_e$ (注: 雷诺数的对数)为横坐标、 $\lg \lambda$ (注: 沿程损失系数的对数)为纵坐标、相对粗糙度 Δ/r (注: Δ 为沙粒粗糙高度; r 为圆管半径)为参变数的图上。1944 年摩迪(Moody)根据前人的试验成果, 在双对数坐标中绘制了 λ 、 R_e 、 Δ/d (注: d 为圆管直径)的关系图, 即为著名的摩迪图。上述图表达了 λ 随 R_e 、 Δ/d 的

变化规律; 并以此规律为依据来划分水流流态见表 1; 为简便, 后文中称之为尼古拉兹流态。

表 1 尼古拉兹流态
Table 1 Nikuradse's water flow pattern

水流流态	界限雷诺数 R_e	流态分区	λ 的影响因素	流量指数 m
层流	< 2300	/	仅与 R_e 线性负相关	1.0
		光滑管区	仅与 $R_e^{0.25}$ 线性负相关	1.75
紊流	> 2300	紊流过渡区	与 R_e 和 Δ/d 都有关	$1.75 < m < 2.0$
		阻力平方区	与 R_e 无关、仅取决于 Δ/d	2.0

注: λ 为沿程损失系数。 Δ 为沙粒粗糙高度, mm; r 为圆管半径, mm。

对于尼古来兹流态, 需要着重指出:

1) 尼古拉兹流态的划分根据是圆形直管内有压管流沿程损失系数 λ 的变化规律; 目的是为了正确选择 λ 的计算公式, 也就是正确使用沿程损失计算公式

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

式中, h_f 为沿程水头损失, m; L 为管长, m; λ 为沿程损失系数; v 为管内流速水头, m/s; g 为重力加速度, 取 $9.8 \text{ m}^2/\text{s}^2$; D 为直管内径, m; L 为管长, m。

将不同流态的 λ 计算式代入, 得到实用公式

$$h_f = f \frac{Q^m}{D^b} L \quad (2)$$

式中, f 、 m 、 b 为分别为摩阻系数、流量指数和管径指数, 微灌工程可按管材材质在文献^[5]中选取; Q 为流量, L/h。

2) 划分尼古拉兹流态的水流条件, 是只有沿程损失

收稿日期: 2011-10-10

作者简介: 张国祥(1941-), 原中国灌排技术开发公司总工程师, 教授级高工, 新疆泓科节水设备制造有限公司技术顾问, 主要从事节水灌溉技术研究、设备开发等。乌鲁木齐 新疆泓科节水设备制造有限公司, 830000。

Email: zhguox928@sina.cn

的有压管道水流；起先只针对圆形直管。有压管道流体工程中，可以把产生沿程损失与局部损失的部位沿管长分段，即沿程损失发生在管材段、局部损失发生在管件处，正确计算沿程损失对于管道流体工程是必需的；故尼古拉兹流态划分对于有压管流是不可或缺的。

3) 总水头损失中全部或部分为局部损失，且无法按二种损失形式分段的水流，不属于尼古拉兹流态的范畴，没有流态的划分。

4) 只产生沿程损失（即无局部损失）的有压管流，其层流与紊流流态的界限雷诺数约为 2300。

2 微灌滴头内水流流态的已有认识

滴头的水力关系为

$$Q = k \cdot h^x \quad (3)$$

也可将其改写为

$$h = (Q/k)^{1/x} = (Q/k)^{m_1} = A Q^{m_1} \quad (4)$$

式中， Q 为滴头流量，L/h； k 为系数，对每种规格的滴头 k 为常数； h 为滴头的进口水头，即滴头工作水头， m ； x 为流态指数； $A = (1/k)^{m_1}$ ； $m_1 = 1/x$ 。

文献[2]中的表 2-2 对滴头水流流态的划分见表 2。表 2 中：(1) $0.5 \leq x \leq 1$ 部分与尼古拉兹流态的划分是相同的，但“光滑层流”一词并无根据，是错误的。(2) $x < 0.5$ 部分，尼古拉兹流态中是没有的，相应表中最后一列的内容也并非流态。

表 2 滴头水流流态
Table 2 Water flow pattern of drippers

灌水器形式	流态指数 x	m_1	流态
压力补偿式	0		可变流道
涡流式	0.4	2.5	涡流
孔口式、迷宫式、双腔管	0.5	2.0	全紊流
螺旋流道式	0.6~0.7	1.43~1.67	光滑紊流
微孔式	0.8~0.9	1.11~1.25	光滑层流
微管或渗水毛管	1.0	1.0	层流

注： $m_1 = 1/x$ ， x 为流态指数。

3 几个问题的讨论

3.1 尼古拉兹流态划分是否适用于微灌滴头

如上所述，尼古拉兹流态是针对圆形直管、只有沿程损失的水流；因此，笔者认为：尼古拉兹流态划分是否适用于微灌滴头，关键在于判断滴头内的水流是否符合划分尼古拉兹流态的水流条件；符合就适用，不符合就不适用。

微灌滴头流道形式多种多样，绝大多数滴头流道中沿程损失和局部损失并存，而且不能按水头损失的 2 种形式将流道沿长度分段；因此，绝大多数滴头的水流，不符合尼古拉兹流态的水流条件，故其成果对于绝大多数微灌滴头是不适用的。

也有适用的特例；如微管（通常为内径 ≤ 2 mm 的塑料管）滴头，其进口的局部损失很小（一般 ≤ 3 cm），可把滴头工作水头看作全部是沿程损失，符合尼古拉兹流态的水流条件，用其界限雷诺数来判别微管滴头的流

态，并按流态选用沿程损失计算公式，便是正确的。需要指出，滴头的流量一般 ≤ 4 L/h，最大不超过 15 L/h；流量为 15 L/h、内径 2 mm 微管的雷诺数约为 2 030（水温 10℃ 时），故微管滴头的流态基本上都为层流；因其流量受水头、水温的影响最大，水力性能差，在工程中已基本被淘汰。

3.2 微灌滴头的工作水头与管道沿程水头损失的区别

式 (3)、式 (4) 中的 h 是滴头的工作水头（即为滴头的总水头损失），是滴头流道沿程损失和局部损失（含进口损失）之和；而式 (1)、式 (2) 中的 h_f 为管流的沿程损失，不含局部水头损失。由式 (2) 中 m 值可判断其适用的管流流态；而式 (4) 中的 m_1 值只能定性地说明确滴头工作水头中沿程损失和局部损失份额的多寡，即随着局部损失在总水头损失中的份额由零增大至 100%，其 m_1 值从 1.0 逐渐增大到 2.0；故流量指数 m_1 与 m 是有原则区别的，不能视为等同（ $m_1 = m = 1$ 除外）。例如管道水流在阻力平方区时 $m = 2$ ，孔口滴头因只有局部损失时 $m_1 = 2$ ，二种情况下水头损失的形式及水头损失计算公式均完全不同；因此，不应认为孔口滴头的流态等同于圆形直管中的紊流阻力平方区。又如若 $m = m_1 = 1.75$ ，可认定圆形直管中为光滑管紊流；但 $m_1 = 1.75$ （即 $x = 0.571$ ）只能说明滴头工作水头中局部损失的份额已相当大，不能认为滴头的流态为光滑管紊流。

笔者认为：由于 h 与 h_f 含义不同，不能仅根据数值上 $m_1 = m$ ，就认为滴头的流态与圆形直管的流态相同。仅当滴头的水头损失只有沿程损失（无局部损失或可忽略）时， m_1 才与 m 等同，尼古拉兹流态才适用于滴头；而这样的情况，见到的仅有微管滴头一例。

3.3 关于水温修正

众所周知，有压管流处于层流、光滑管紊流、紊流过渡区时，摩擦系数 f 都与雷诺数有关，而水温是影响雷诺数的因子之一；故在以上 3 种流态下计算沿程损失水头时，需考虑水温影响。管流计算常为已知流量求沿程损失水头，当设计水温与所用公式所考虑的水温不一致时，需对沿程损失水头做水温修正。但局部水头损失与水温无关，不需做水温修正。

微灌滴头，常为已知工作水头计算流量，以往的做法是把尼古拉兹流态套用于滴头，按 m_1 等同于 m ，对滴头流量做水温修正，即认为滴头工作水头全部是沿程损失水头，显然与实际（除微管滴头外）不符。

$x = 1$ ，应按层流流态对滴头的流量做水温修正； $x \leq 0.5$ ，滴头工作水头基本上全为局部损失，不需要做水温修正；当 $1 > x > 0.5$ ，似应在沿程损失份额比较大时做流量的水温修正，但鉴于以下情况：(1) 目前尚无法区分滴头内沿程损失与局部损失各占的份额；也还没有成熟的修正方法。(2) 目前工程中常用滴头的 x 值基本上已在 0.65 以下，且随着技术进步，滴头的 x 值还会进一步降低；所以，对于常用滴头，沿程损失占工作水头的份额已不大；水温修正量有限；(3) 除微管滴头外，其余滴头的水力关系，均由水力试验实测得到。

因此,目前 $1 > x > 0.5$ 时可不作滴头流量的水温修正。必要时(如设计水温与试验水温的差别 $> 15^{\circ}\text{C}$),可用设计温度的水进行滴头的水力试验,得到符合水温要求的水力关系式。

3.4 对划分滴头流态的必要性思考和建议

如前所述,尼古拉兹流态划分对于有压管流工程的设计与计算是不可或缺的,但将其套用到微灌滴头上却是错误的;微灌系统设计与计算所需要的滴头水力关系(除微管滴头外),一直以来都是通过水力试验实测得到的,故微灌滴头不存在划分流态的实际需要。

鉴于仅微管滴头有用尼古拉兹成果的需要,但该滴头已基本被淘汰。建议今后应放弃对滴头流态的区分;为防止重陷套用尼古拉兹流态的误区, x 宜称为水头指数;以往紊流滴头是特指滴头内流态为紊流的阻力平方区,这与实际不符,故不应再使用紊流滴头的称呼;滴头的水力性能,可通过水头指数 x 值来比较与评价。

4 无弹性件滴头流态指数 $x < 0.5$ 的机理探索

补偿滴头的出现,使滴头流量受水头影响变得更小,甚至在某个水头范围内,滴头流量为常量,有利于提高灌水质量,并减少微灌系统设计的工作量。补偿滴头,是在滴头流道内装有弹性件;随着滴头工作水头的增大(或减小),弹性件的变形量会增大(或减小),导致过流断面的面积减小(或增大),从而降低甚至完全抵消了滴头工作水头对流量的影响,使 x 值接近或等于零。这是装有弹性件滴头的补偿机理,可简称为“面积补偿”。如以色列产的“卡体夫”滴头,当 $h=5\sim 35\text{ m}$ 范围内,滴头流量几乎为常数,其性能相当优越。

对于无弹性件(即边界固定流道)的滴头,受尼古拉兹流态观念的影响,以前普遍认为其流态指数 x 值不会小于 0.5 。近年来,滴头流道的消能效果有了大幅提高,一些无弹性件的滴头实测资料出现了 $x < 0.5$ 的情况。

对图1所示齿形流道20个单元,在2和10 m水头下,用Fluent软件计算流量 Q (见表3),并绘出二个水头下第10单元的流线图(见图2)。从图中可见,由于流道边界急剧变化,流动惯性导致水流从齿尖开始脱离边界,在齿下游面形成范围较大(约占流道一半)的迴流区,提高了消能效果,也压缩了主流过水断面。在2张流线图上标出控制断面的最小过水宽度线列于表3。可见10 m水头下的最小过水宽度(因流道高度为1 mm,过水宽度与过水断面面积等值)缩小为2 m水头下的93.2%,证实存在过水断面随水头增大而减小的现象。

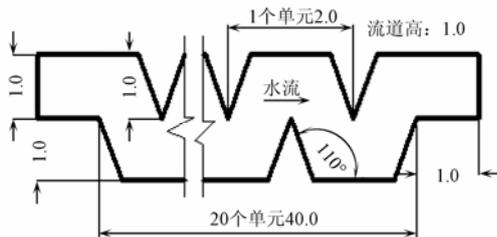


图1 滴头流道示意图
Fig.1 Schematic diagram of the dripper's channel

表3 滴头流量计算表
Table 3 Calculation of dripper discharge

图3-1 流道的水力关系		$Q=0.931h^{0.471}$	
流道高度/mm	1.0		
滴头工作水头 h/m	$h_2=2.0$	$h_{10}=10.0$	
滴头流量 $Q/(\text{L}\cdot\text{h}^{-1})$	$Q_2=1.28$	$Q_{10}=2.74$	
坐标轴 1 mm 长的测量值/mm	34.22	34.12	
最小过水宽度的测量值/mm	12.60	11.72	
实际最小过水宽度 L/mm	0.368	0.343	
2 个水头下最小过水宽度比例	/	0.932	

注:表中字母下标表示滴头工作水头。最小过水宽度=最小过水宽度测量值/坐标轴(1 mm)的测量值。

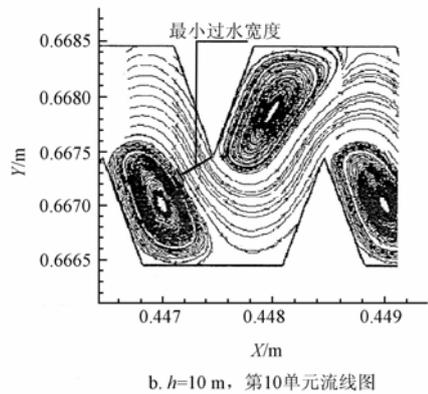
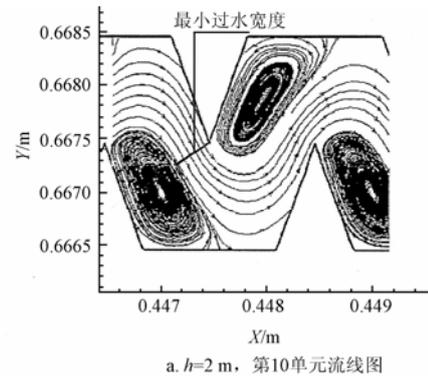


图2 滴头在不同工作水头下的流线图
Fig.2 Flow pattern under different operating heads of drippers

依据表3,作以下粗略估算:工作水头10 m时,如果过流断面没有发生收缩,即过流断面面积仍为 A_2 ,此时的流量记为 Q'_{10} ,应有: $Q'_{10}=Q_{10}/(A_{10}/A_2)=2.74/0.932=2.940\text{ L/h}$;根据式(3)应有: $Q'_{10}/Q_2=(h_{10}/h_2)^x$,因 $Q'_{10}/Q_2=2.940/1.28=2.297$, $(h_{10}/h_2)^x=(10/2)^x$,可得: $2.297=5^x$,对前式两边取对数,可求得滴头过流断面不发生收缩情况下的 x 值 $x=\lg 2.297/\lg 5=0.517$ 。结果表明:由于滴头工作水头从2 m升高到10 m,水流惯性随流速增大而加大,导致过流面积减小至2 m水头时的93.2%,使滴头的 x 值从0.517降至0.471;减小了水头对流量的影响,体现了一定的补偿作用,产生面积补偿的原因不是弹性件的变形,而是流道边界的急剧变化和与水流惯性与水头(流速)正相关;这应该是无弹性件(即边界固

定流道) 滴头 x 值也可小于 0.5 的机理。

可以想见, 水流脱离边界的现象, 不应是齿形流道所独有。凡边界有急剧变化的流道, 流道内边界急变的凸点, 都存在着水流由此脱离边界的现象, 都会有程度不同的面积补偿作用。如边缝式滴灌带的“长城”形流道, 水流在流道弯折处的凸点也会脱离边界、产生迴流, 过流面积随流速加大而减小, 从而有一定程度的补偿作用; 但因“长城”形流道内沿程损失所占份额比齿形流道要大, 而“面积”补偿作用又相对较低, 补偿后的流态指数仍大于 0.5 (约为 0.61), 因而不易被人们所察觉。

5 初步结论

1) 划分尼古拉兹流态的水流条件是只有沿程损失的水流; 其依据是管流沿程损失系数 λ 的变化规律; 目的是正确选择 λ 的计算公式, 以解决管道工程沿程水头损失的计算问题; 它对于管道工程设计计算是不可或缺的。

2) 微管滴头的水流符合尼古拉兹流态的划分条件, 故将尼古拉兹流态应用于微管滴头是正确的; 但微管滴头已基本被淘汰。其它流道形式的滴头, 其工作水头兼有局部损失和沿程损失, 或全部为局部损失, 不符合划分尼古拉兹流态的水流条件; 以往将尼古拉兹流态套用到全部滴头的做法是错误的。建议: 今后不再区分滴头流态 (除微管滴头外)、不再使用紊流滴头的称呼; x 不宜称为流态指数, 建议称为水头指数; 至于滴头的水力性能, 可通过滴头水头指数 x 值来比较与评价。

3) 以往将滴头的 m_1 值等同于有压管流沿程损失公式中的 m 值, 即把滴头的工作水头视为有压管流的沿程损失水头, 并按管流沿程损失对滴头流量做水温修正的做法 (除微管滴头外), 必然导致滴头流量的修正过度。

认为: 当 $x=1$, 应按层流流态对滴头流量做水温修正; 当 $x \leq 0.5$, 滴头流道内基本上全为局部损失, 不需要做水温修正; 当 $1 > x > 0.5$, 鉴于目前的技术状况, 也可不做水温修正; 必要时, 可用设计温度的水进行滴头的水力试验, 得到符合水温要求的水力关系式。

5) 滴头补偿性 ($x < 0.5$) 的机理是过流面积随水头增大而减小, 可称之为面积补偿。有弹性件的滴头, 是通过弹性件的变形来实现; 无弹性件 (流道边界固定) 的滴头, 是因流道边界的急剧变化, 惯性使水流从流道内边界急变的凸点开始脱离边界, 并出现迴流区和过流断面被压缩的现象; 因水流惯性与滴头工作水头 (流速) 成正相关, 从而产生面积补偿效应。但是, 目前这种补偿效果还比较有限。

[参 考 文 献]

- [1] 美国夏威夷大学教授吴义伯讲学. 滴灌系统水力设计讲义. 水利水电科学研究院、北京农业机械化学院整理, 1981年5月, 14—15.
- [2] 傅琳, 董文楚, 郑耀泉, 等. 微灌工程技术指南. 水利电力出版社, 1988年9月第一版, 19—21.
- [3] 李云开, 杨培岭. 滴灌水器迷宫式流道内部流体流动特性分析与试验研究[J]. 水利学报, 2005, 36(7): 886—890. Li Yunkai, Yang Peiling, Ren Shumei, et al. Experimental study on flow characteristics in labyrinth path emitters[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(7): 886—890. (in Chinese with English abstract)
- [4] 中国水利部农村水利司、中国灌溉排水发展中心编著. 节水灌溉工程实用手册. 中国水利水电出版社, 2005年8月第一版, 321.
- [5] 中国国家标准: 微灌工程技术规范. GB/T 50485—2009.

Some problems of water flow pattern and compensation mechanism for micro-irrigation emitters

Zhang Guoxiang, Ding Sujiang

(Xinjiang Hongke Water saving Equipment Manufacture Co-operative Limited Company, Urumqi 830000, China)

Abstract: Hydraulic calculation of micro-irrigation emitters is important for pipeline engineering design. Classified basis of water flow pattern and the flow condition of pressure pipes, the differences of the operating head of drip emitters and frictional head loss flow modification, and water temperature modification of dripper discharge were studied. Then the reason for flow stance index $x < 0.5$ observed in hydraulic measured data of inelasticity elements was analyzed, and the method of area compensation was proposed. Results show that: 1) it's wrong that the water flow pattern in pressure pipes based on Nituradse's experimental results were applied in hydraulic calculation of micro-irrigation emitters except for microtubule drippers; 2) water temperature modification of drippers should be done for flow stance index $x=1$, not for $x \leq 0.5$ not because flow state is at drag square area but because loss of pipes are presented as local loss and not for $1 > x > 0.5$ respectively. The hydraulic relationship at different water temperature can be got by hydraulic experiments at corresponding water temperature for drippers of $1 > x > 0.5$; 3) the way of classifying water flow pattern of drippers should be abandoned because this way just suitable for microtubule drippers cannot be applied for others; and 4) the reason for $x < 0.5$ of is area compensation effect, which means the area of passage decreased with water head increased, because of rapid changes for flow channel boundary and a positive correlation between the flow inertia and the water head.

Key words: irrigation, hydraulics, flow, compensation, micro-irrigation emitters, the flow pattern, water temperature modification, inelasticity elements