

# 按两相流动对污水管道输送阻力的理论研究

陈涛郁

(昆明理工大学 建筑工程学院, 云南 昆明 650224)

**摘要:** 目前的污水管道设计是在忽略了污水的多相流特性, 而将其在管道内的流动视为单相均匀流的情况下, 主要采用谢才公式来进行水力计算的. 论文将污水视为液-固两相流体, 依据相似理论, 结合现有液-固、气-固两相流动管道阻力计算的经验公式, 提出了更为准确地计算污水在管道内流动阻力的方法和公式. 根据典型的生活污水水质资料, 用该方法分析计算后可得出明确的结论: 污水在管道内流动的沿程损失与清水流动时近乎相等, 所以目前在管道设计水力计算中所采用的方法是可行的; 污水两相流动时的局部阻力显著地大于清水流动时, 在工程设计中不可忽视, 尤其是在流量大、弯管多的情况下 (如区域排水系统中).

**关键词:** 污水管道; 两相流动; 沿程损失; 管道设计; 水力计算

中图分类号: TU 992.22 文献标识码: A 文章编号: 1007-855X(2007)03-0068-04

## Theoretical Research on the Flow Resistance of Sewage in Pipes from Two Phase Fluid

CHEN Tao-yu

(Faculty of Civil and Architectural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650224, China)

**Abstract** The sewage pipes flow is hypothesized as single phase and uniform flow, and the Chezy formulas are usually used in designing sewer system. Now sewage is regarded as two phase fluid including liquid and solid and it proposes the method and formulas which are associated with empirical equations used in practice at present to calculate the flow resistance of sewage in pipes based on laws of similarity. According to the typical sewage quality datum at the moment and through analyzing and calculating, it reaches definite conclusions as follows: The linear loss of sewage flow in pipes is approximately equal to that of water pipes flow. So it's reasonable to accept the method in use at present while the local resistance of sewage flow as two phase fluid is larger than that of water flow under the same conditions. In general, the accrual is too obvious to be ignored in engineering design, especially when the flow quantity is large and there are many elbows (for example, in regional drainage).

**Key words** wastewater pipe; two phase flow; linear loss; pipe design; hydraulic calculation

### 0 引言

水是生命之源,也是国民经济发展最重要的保证因素.人类的社会生产实践表明,水是对生态、经济和社会有巨大价值的物质,是综合国力的重要组成部分,其合理开发利用的程度是国民经济发展水平的重要标志之一.我国的水资源先天不足,且在时空分布上极不平衡:南多北少,东多西少;年际变化大,丰枯年水量相差几十倍.且由于当前工业的快速发展,水资源的过度开发以及给水排水设施的不足,许多城市存在着水资源危机.

自然界的水是统一循环的,人类社会对水的使用应顺应这一过程.缺乏对给水排水统一性的认识,是导致我国水资源和水环境陷于困境的主要原因.单纯考虑城市给水工程,欠考虑排水工程,使城市污水污

收稿日期: 2006-10-31. 基金项目: 昆明理工大学科学研究启动基金资助项目 (项目编号: 校青 2006-35).

第一作者简介: 陈涛郁 (1973-), 男, 硕士, 讲师. 主要研究方向: 市政工程. E-mail: cty200555@sohu.com

染了水体,影响了给水水质.因此,在今后相当长的一段时期内,我们必须加快兴建和完善城市排水工程设施的进度,以遏制水环境状况进一步恶化的趋势.

管道是排水系统重要的组成部分,其投资往往占总投资额的较大比重.因此,合理地设计污水管道事关重大.

## 1 现状及问题的提出

### 1.1 目前的处理方法

假定管道内的水流为均匀流,则:

$$Q = \omega \cdot v \quad (1)$$

$$v = C \sqrt{R \cdot I} = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} \cdot I^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

在具体计算中,已知设计流量  $Q$  及管道粗糙系数  $n$ , 需要求管径  $d$ 、水力半径  $R$ 、充满度  $h/d$ 、管道坡度  $I$  和流速  $v$ . 一般采用水力计算图. 对每一张图而言,  $d$  和  $n$  是已知数, 图中的曲线表示  $Q, v, I, h/d$  之间的关系. 这 4 个因素中, 只要知道其中 2 个就可以查出其它 2 个.

由此可见,目前的方法是在流动处于阻力平方区的情况下,忽略了污水的多相流特性,而将其视为单相流体(水)来处理<sup>[2]</sup>.

### 1.2 问题的提出与研究的意义

在能够保证不淤积的前提下,计算流动阻力是研究管道输送的主要目的. 目前的处理方法未考虑污水的多相流特性,导致理论上的欠缺. 更重要的是,随着区域排水系统的发展,铺设污水管道时需要面临众多的穿越江河、翻山越岭等情况,此时设置弯管等局部构件是必然的选择. 在此,是否还能按单相流体(水)来计算流动阻力很值得怀疑. 另外,压力式和真空式排水系统的优越性使其成为今后排水系统发展的新方向,而建设这些系统需要准确地计算水头损失.

上述原因使得从多(两)相流的角度来研究污水管道的流动阻力问题显得十分必要.

## 2 现有管道内两相流动阻力的研究成果

一般认为,物质从宏观特性出发可以分为 4 种不同的相(或态): 固相、液相、气相和等离子相. 在日常生活和生产过程中,我们更多地遇到的是不同相的物质的混合流动. 这种流动体系称为多相系. 多相系的流动称为多相流动.

多相流动中最简单的流动是由物质的两个相所组成的,这种流动称为两相流动. 两相流动可以是同类物质的两个相(如水蒸气-水),或不同类物质的两个相(如空气-水)所组成的流动. 若不考虑等离子相,两相流动可按其相的组合不同,分为气-液、气-固及液-固两相流. 由于存在两相界面上有相间作用力,两相间有相对滑动而引起附加机械能损失,两相间有传热和传质以及相间可能伴随着化学反应等因素,两相流动比单相流动要复杂得多.<sup>[3]</sup>

1) 沿程阻力<sup>[4]</sup>. 液-固均质流. 按两相流的扩散理论,可由下列公式计算管道沿程阻力:

$$h_{lm} = \frac{\gamma_m}{\gamma} \lambda \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g} \quad (3)$$

液-固非均质流. 对于大小均匀颗粒的非均质系统水平管道:

$$\lambda_m = \lambda \left\{ 1 + k \left[ \frac{gd}{v^2} \left( \frac{\rho - \rho_1}{\rho} \frac{1}{\sqrt{C_D}} \right)^{\frac{3}{2}} C_S \right] \right\} \quad (4)$$

2) 局部阻力. 目前尚未见到用于计算管道内液-固两相流动局部(如弯道处)阻力的公式.

对于气-固两相流动,弯管阻力的大小与转弯角度、曲率半径与管径之比( $r/d$ )、管壁粗糙度、相邻管段特性及输送物料的性质等因素有关<sup>[3,4]</sup>.

$$\Delta p_b = \zeta \frac{v_a^2}{2g} = (\zeta_u + \zeta_s) \frac{v_a^2}{2g} = \zeta_u \left[ 1 + \frac{\zeta_s}{\zeta_u} \right] \frac{v_a^2}{2g} \quad (5)$$

根据实验结果,水平面内及垂直面内的弯管阻力系数计算公式如下:

水平面内:

$$\zeta = \zeta_u \left\{ 1 + 3.09 \left[ 0.188 \left( \frac{r}{d} \right)^2 - 5.88 \frac{r}{d} + 49 \right] \left[ \frac{\lambda_s}{\zeta_u} \right]^{0.742} \frac{\theta_b}{90} \right\} \quad (6)$$

垂直面内:

$$\zeta = \zeta_u \left\{ 1 + 3.09 \left[ 0.188 \left( \frac{r}{d} \right)^2 - 5.88 \frac{r}{d} + 57 \right] \left[ \frac{\lambda_s}{\zeta_u} \right]^{0.742} \frac{\theta_b}{90} \right\} \quad (7)$$

### 3 相似现象

表征流动现象的基本物理量可以分为 3 类:第 1 类是描述几何形状的物理量,如长度、方位、面积、体积等;第 2 类是描述运动状况的,如速度、加速度、流量等;第 3 类是表述动力特征的,如体积力和表面力、动量、能量等。因此常用几何相似、运动相似和动力相似来定义流动的相似。这 3 种相似只是更为具体地表述了流动相似的涵义。相似理论并不仅仅局限于流动现象,它对能量的交换与传递、多相流体的流动等现象同样适用。

凡同一类现象,被同一组方程所描述,单值条件相似,而且由单值条件中的物理量所组成的相似准则数相等,则这些现象就必定相似<sup>[5]</sup>。

### 4 计算污水管道输送阻力的方法

#### 4.1 沿程阻力

按液-固非均质流考虑,划分粒径组并用式(4)计算各组所产生的沿程阻力系数增量后取其和,即可求得总的沿程阻力系数  $\lambda_m (1 + \sum \Delta \lambda_{m,i}) \lambda_w$  ( $\lambda_w$  为清水的沿程阻力系数)。

#### 4.2 局部阻力

管道内的气-固两相流动和液-固两相流动属同一现象,都可用连续性方程和 N-S 方程等基本方程来描述。另外,对于流动阻力问题,Re 是个基本的影响因素。但各种实验资料表明,当 Re 超过某一数值后,阻力系数就不再随 Re 而变化。也就是在一定的 Re 范围内,阻力的大小与 Re 无关。这个流动范围称为自模区。实际上,输送工程中的管道流动大多处于自模区。因此,对于管道流动,可以运用气-固两相流动公式来计算液-固两相流动的局部阻力,只是其中个别参数的定义需略作调整。

### 5 计算

#### 5.1 计算参数

污水悬浮物浓度随污水来源及所处区域不同而有较大变化。如滇池整体悬浮物浓度基本处于 0.8~0.9 之间<sup>[6]</sup>。一般污水处理厂沉砂池中去除的砂粒比重为 2.65,粒径为 0.2 mm 以上。城市污水的沉砂量按每  $10^6 \text{ m}^3$  污水沉砂  $30 \text{ m}^3$  计算,且沉砂的(质量)含水率约为 60%,密度约为  $1500 \text{ kg/m}^3$ <sup>[7]</sup>。

在此作两点简化处理:

1) 溶解性固体增加了流体的粘度,但根据 Einstein 公式 ( $\mu_m / \mu = 1 + 2.5\varphi$ ,  $\varphi$  为固体的体积分数,一般情况下污水的  $\varphi$  值小于 0.001),  $\mu_m$  与  $\mu$  近似相等。

2) 悬浮性固体中,一部分一直悬浮于水中(比重较小或比重虽较大但粒径较小),在此称其为长期悬浮颗粒;另一部分为可沉降固体(即沉砂池可去除的部分)。

水(20°C)的粘滞系数  $\mu = 1.005 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ,  $\nu = 1.007 \times 10^{-6} \text{ m}^2 / \text{s}$

设管径  $d = 1 \text{ m}$ , 平均流速  $u = 1 \text{ m/s}$

## 5.2 沿程阻力

1) 由于含可沉降固体所增加的沿程阻力系数  $\Delta\lambda_{m1}$  用试算法计算沉降末速  $u_{s1}$  进而求出颗粒阻力系数  $C_{D1}$  后, 运用公式 (4) 可得:

$$\lambda_{m1} = (1 + 0.013) \lambda_w, \text{ 即 } \Delta\lambda_{m1} = 0.013 \lambda_w.$$

2) 由于含长期悬浮颗粒所增加的沿程阻力系数  $\Delta\lambda_{m2}$  同上, 用试算法计算沉降末速  $u_{s2}$  进而求出颗粒阻力系数  $C_{D2}$  后, 运用公式 (4) 可得:

$$\lambda_{m2} = (1 + 8.28 \times 10^{-5}) \lambda_w, \text{ 即 } \Delta\lambda_{m2} = 8.28 \times 10^{-5} \lambda_w.$$

## 5.3 局部阻力

1) 由于含可沉降固体所增加的局部阻力系数  $\Delta\zeta_1$  用试算法计算沉降末速  $u_{s1}$  进而求出  $Re_{s1}$  后, 运用公式 (6) 及 (7) 可得: [8] 水平面内的  $90^\circ$  弯管  $\Delta\zeta_{m1} = 0.027\zeta_w$  ( $\zeta_w$  为清水的局部阻力系数); 垂直面内的  $90^\circ$  弯管  $\Delta\zeta_{m1} = 0.033\zeta_w$ .

2) 由于含长期悬浮颗粒所增加的局部阻力系数  $\Delta\zeta_2$  用试算法计算沉降末速  $u_{s2}$  进而求出  $Re_{s2}$  后, 运用公式 (6) 及 (7) 可得: 水平面内的  $90^\circ$  弯管  $\Delta\zeta_{m2} = 0.11\zeta_w$ ; 垂直面内的  $90^\circ$  弯管  $\Delta\zeta_{m2} = 0.14\zeta_w$ .

## 6 结束语

1) 按非均质流计算, 污水管道的沿程阻力系数  $\lambda_m = (1 + \Delta\lambda_{m1} + \Delta\lambda_{m2}) \lambda_w = (1 + 0.013 + 8.28 \times 10^{-5}) \lambda_w$ . 与清水相比, 增加率约为 1.3%, 在一般情况下可以忽略不计. 因此, 目前的处理方法是可行的;

2) 在管道内 (弯管处) 流动时的局部阻力系数  $\zeta_m = (1 + \Delta\zeta_{m1} + \Delta\zeta_{m2}) \zeta_w = 1.14\zeta_w$  (水平面内) 或  $1.17\zeta_w$  (垂直面内), 均显著地大于清水流动时的值. 由此可见, 污水的两相流特性在此必须考虑.

3) 污水管大多按不满流设计, 但谢才公式仅是沿程阻力公式在阻力平方区中的变形. [9] 因此, 管道内有压流动的沿程阻力公式同样适用于无压流, 即结论 1) 对无压流亦有效. 对此可通过实验予以验证;

4) 论文仅依据典型生活污水水质结合计算公式, 得出管径为 1 m, 流速为 1 m/s 的特定情况下, 在水平面及垂直面内  $90^\circ$  弯管的局部阻力系数. 对各种情况 (不同污水水质、不同管径及流速、以及不同局部构件等) 下的局部阻力, 应通过大量实验得出可靠的计算公式 (或图表), 以方便使用.

## 参考文献:

- [1] 建设部给水排水产品标准化技术委员会. 给水排水产品标准汇编 (上) [M]. 北京: 中国标准出版社, 2000
- [2] 孙慧修. 排水工程 (上) [M]. 第 3 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 1996
- [3] 王文琪. 两相流动 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1989
- [4] 佟庆理. 两相流动理论基础 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1982
- [5] 夏震寰. 现代水力学 (一) 控制流动的原理 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1992
- [6] 解亚龙, 李勃, 王星捷, 等. 滇池悬浮物污染丰度的遥感检测分析 [J]. 昆明理工大学学报: 理工版, 2006, 31(4): 73-76
- [7] 高廷耀, 顾国维. 水污染控制工程 (下) [M]. 第 2 版. 北京: 高等教育出版社, 1999
- [8] 中国市政工程华北设计研究院. 给水排水设计手册 (12) [M]. 第 2 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001
- [9] 禹华谦. 工程流体力学 (水力学) [M]. 成都: 西南交通大学出版社, 1999