

真空排水系统中气液比的影响因素及其数值确定

姚 越, 周 律, 胡若兰, 林瑀璇
(清华大学 环境学院, 北京 100084)

摘 要: 气液比是真空排水系统的关键设计参数,了解其影响因素和数值确定方法对实现系统的节能、高效运行至关重要。气液两相流的流型是气液比的重要影响因素,二者关系的本质是气相速度与气液比的关系。借助气液两相流理论,总结了气相实际速度与气液比的定量关系,并借此对目前实际工程中使用的经验值进行合理性检验。结果表明,对于锯齿型铺设的真空排水管道,现有气液比经验值能够确保流体在管道提升段前端的低洼处形成环状流,可以保证污水被顺利输送。因此,现有气液比经验值对锯齿型铺设的真空排水管网基本适用。

关键词: 真空排水系统; 气液比; 环状流; 气相速度; 工程经验值

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2017)03-0033-04

Influencing Factors of Air-to-liquid Ratio in Vacuum Drainage Systems and Determination of Their Values

YAO Yue, ZHOU Lyu, HU Ruo-lan, LIN Yu-xuan
(School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Air-to-liquid ratio (ALR) is the key design parameter for the vacuum drainage systems, and understanding its influencing factors and the determination of their values are essential for achieving energy-saving and efficient operation of the system. Gas-liquid two-phase flow patterns are major influencing factors for ALR. The nature of the relationship between both is the relationship between the gas-phase velocity and ALR. The quantitative relationship between the gas-phase velocity and ALR was summarized by means of gas-liquid two-phase flow theory and the rationality of the engineering experience values of the ALR was examined. The results showed that the current empirical value could ensure the formation of annular flow in the low area on the front of ascension pipe in the sawtooth vacuum drainage systems, so that the wastewater could be transported smoothly. Accordingly, the engineering experience values of ALR are universal for the sawtooth vacuum drainage systems.

Key words: vacuum drainage system; air-to-liquid ratio (ALR); annular flow; gas-phase velocity; engineering experience value

真空排水系统因其依靠气压梯度进行污水输送,故输送能力较强;在管道安装方面对于地形的适应性较好,施工难度小^[1]。因此,该系统越来越多

地受到各方关注。国外对真空排水系统十分重视,欧盟出台了《真空排水系统标准》(EN 12109),英国、日本、德国、美国等国家也都有真空排水系统的

相关标准。我国已于2012年发布了《室外真空排水系统工程技术规程》(CECS 316—2012),并在个别地区采用了真空排水系统。但该系统在实际应用中设计的基础理论和重要参数仍有待进一步研究。

气液比(ALR)为系统管道中空气体积与污水体积之比。由于空气的体积在大气和真空管道中数值不同,由此也产生了两种表述方法:常压气液比和负压气液比^[2]。真空环境下气体膨胀,因此后者大于前者。本文中的气液比是指负压气液比。气液比是衡量真空排水系统污水输送能力的关键参数。合理的气液比能保证空气有足够的动力携带污水,从而将污水顺利输送到集中储存或处理设施。然而,由于系统内的流体状态复杂多变,其数值往往难以确定。因此,为确保系统的稳定运行,有必要研究气液比的影响因素及其数值确定方法。目前实际工程中气液比通常采用经验值,但不同工程面临的环境条件差异较大,若要将现有经验值在更大范围的真空排水系统设计中应用,其合理性有待进一步讨论。

为此,首先通过分析真空排水系统的工作原理,归纳流体在管内流动的过程中影响气液比的关键因素,并根据气液两相流的相关理论,总结出气液比与该影响因素的定量关系。之后基于现有的气液比工程经验值,考虑污水被顺利输送时需满足的关键条件,利用得到的定量关系对工程经验值进行检验,判断当前气液比数值确定方法的合理性。

1 气液比的影响因素及定量关系

1.1 气液比对真空排水系统输送动力的影响

真空排水系统的动力在于气压梯度。因此,气液比越大,在系统界面阀打开后涌入的空气越多,越有足够的动力挟带污水前进。在真空排水常见的锯齿型管道布置形式中,污水易停留在每一个提升段前端的低洼处(如图1所示)。如果气液比过小,抽吸污水的动力不足,容易导致污水在此处堵塞淤积,使得系统无法正常运行;反之则需要功率更大的真空泵满足系统抽气量,相应地会增加系统能耗^[3]。因此,气液比数值应在一个合理的范围内。



图1 锯齿型管道布置方式

Fig. 1 Sawtooth profile design of vacuum drainage system

1.2 流体流型与气液比的关系

对一个特定的真空排水管网,污水体积由管网服务半径内的人均排水定额决定,一般为定值;气体体积由系统抽气量决定。因此,根据气液比的定义,真空排水系统的气液比数值由系统抽气量决定。进入系统的空气量不同,则管道内气相速度不同。又因为真空排水管网中的液体是被空气挟带前进,故同时也会在一定程度上造成液相速度的差异。而气液两相速度共同决定了管道内流体的流型,因此,气液比的大小和流体流型通过系统抽气量紧密相关,流型是气液比的重要影响因素。

对于锯齿型的真空排水管网,不同位置的流体流型也不同。保证系统正常运行的关键位置之一是每个提升段前端的低洼处,因此,关注此处的流型特点十分必要。根据张佳杰^[4]和张健^[5]对于流体速度和流型特点的研究,在提升段前端的低洼处,污水被提升的瞬间流体的流型为环状流,其气体流速一般为6~60 m/s,远大于液体流速。故气体在管道中心高速流过,少量液体呈喷雾状夹杂其中,剩余液体形成膜状沿管壁运动,从而形成环状液层^[6]。

1.3 环状流时气相速度与气液比的定量关系

由于流型由气液两相速度决定,而液相速度在一定程度上由气相速度决定,因此流型与气液比的关系本质上能够通过气相速度与气液比的关系进行量化。以下将借助气液两相流的相关理论,总结出环状流时气相速度与气液比的定量关系。

1.3.1 气液两相流理论中与气液比相关的概念

在气液两相流理论中,与气液比相关的概念主要有容积含气率 β 和截面含气率 α ^[7]。

$$\beta = \frac{V_G}{V} = \frac{V_G}{V_L + V_G} \quad (1)$$

式中 V ——单位时间流过通道某一截面的两相流总容积, m^3

V_L ——单位时间流过通道某一截面的液相体积, m^3

V_G ——单位时间流过通道某一截面的气相体积, m^3

$$\alpha = \frac{A_G}{A} = \frac{A_G}{A_L + A_G} \quad (2)$$

式中 A ——总流道截面积, m^2

A_L ——液相所占的流道截面积, m^2

A_G ——气相所占的流道截面积, m^2

根据气液比的定义,真空排水系统整体的气液比(ALR)数值可表示为式(3)的形式:

$$ALR = \frac{V_G}{V_L} \quad (3)$$

因此,真空排水管网的容积含气率可用气液比表示为:

$$\beta = \frac{ALR}{ALR + 1} \quad (4)$$

1.3.2 气相速度与气液比的定量关系推导

① 截面含气率与气液比的定量关系

周云龙等^[8]借助试验分析与理论模型相结合的方法得到环状流对应的 α 与 β 的关系。结合式(4),可得到截面含气率与气液比的关系,即:

$$\alpha = 0.92\beta^{2.3} = 0.92\left(\frac{ALR}{ALR + 1}\right)^{2.3} \quad (5)$$

② 气相表观速度与气相实际速度的关系

气液两相流理论中,单相表观速度定义为相容积流量除以通道横截面积,故气相表观速度与实际速度的关系可由以下过程得到:

$$u_G = \frac{Q_G}{A_G} = \frac{Q_G}{A} \times \frac{A}{A_G} = u_{GS} \times \frac{1}{\alpha} = \frac{u_{GS}}{\alpha} \quad (6)$$

式中 u_G ——气相实际速度, m/s

Q_G ——气相容积流量, m³/s

u_{GS} ——气相表观速度, m/s

③ 气相实际速度与气液比的定量关系

式(6)中,气相表观速度的计算参考段金明利用气液两相流理论得到的推导结果,环状流对应的截面含气率参考式(5),则环状流时气相实际速度与气液比的定量关系可表示为:

$$u_G = \frac{u_{GS}}{\alpha} = \sqrt{\frac{gd(\rho_L - \rho_G)\sin\theta}{\rho_G}} / \left[0.92\left(\frac{ALR}{ALR + 1}\right)^{2.3}\right] \quad (7)$$

式中 g ——重力加速度,取 9.8 m/s²

d ——管道内径, m

ρ_L ——管道内液相密度,近似取 1 100 kg/m³

ρ_G ——管道内气相密度,近似取 1.2 kg/m³

θ ——提升段管道倾角, 45°

2 气液比数值确定方法及合理性检验

2.1 现有气液比范围确定方法

由于真空排水管道内气流和水流的动态过程复杂多变,气液比的数值在不同位置、不同时刻并不是

一个定值。目前,在实际真空排水系统设计中,气液比的确定往往根据工程经验,通过服务地区主管长度和沿主管长度的人口密度来估算气液比的范围。具体的估算结果如表 1 所示。

表 1 真空排水主管平均气液比估算

Tab. 1 Estimation results of air-to-liquid ratio in vacuum drainage trunk pipes

主管管长度/m	沿主管长度的人口密度/(人·m ⁻¹)			
	<0.05	0.10	0.20	>0.50
500	3.5~7	3~6	2.5~5	2~5
1 000	4~8	3.5~7	3~6	2.5~5
1 500	5~9	4~8	3.5~7	3~6
2 000	6~10	5~9	4~8	3.5~7
3 000	7~12	6~10	5~9	4~8
4 000	8~15	7~12	6~10	5~9

表 1 中的数据经过实践的检验,对现有真空排水项目基本适用,尤其是对地势相对平坦、排水管网分布均匀的服务地区。但由于资料有限,不同工程面临的限制条件各有差异,该数值的合理性缺少一定的理论支持。

2.2 气液比工程经验值的合理性检验

根据前文分析,污水被顺利输送的关键部位在于管道提升段前端的低洼处,此处流体必须形成环状流,才能实现污水挟带。同时,通过理论分析得到了环状流时气相实际速度与气液比的定量关系。在此基础上,考虑将气液比的工程经验值代入定量关系式得到对应的气相速度数值,与环状流对气相速度的要求对比,若符合要求,则说明采用该经验值能够保证流体在管道提升段前端的低洼处形成环状流,从而证明经验值合理。

2.2.1 管道内径的确定

由式(7)可知,若将气液比的工程经验值视为已知量代入计算,则还需要确定管道内径才能得到相应的气相实际速度。参考美国 AIRVAC 公司的实际设计案例,真空排水系统的主主管管径通常采用 4、6、8 或 10 in(即 10.16、15.24、20.32、25.4 cm)的规格,内径分别相当于大约 100、150、200、250 mm。参考不同管径的系统所能服务的最大住宅数,假设每户住宅的平均人口为 3.5 人,则能得到不同管径的系统对应的最大服务人数,结果如表 2 所示。若已知主管长度和沿管路人员密度,则二者乘积即为该管段所能服务的人数,得到对应的管道内径估算结果,如表 3 所示。

表2 不同管径的系统所能服务的最大住宅数和人数

Tab.2 Maximum of houses and population served by vacuum drainage systems

管道内径 d/mm	最大服务住宅数/户	最大服务人数/人
100	80	280
150	210	735
200	420	1 470
250	750	2 625

表3 各主干管长度和沿管路人员密度所对应的管道内径

Tab.3 Internal diameters of pipelines in different vacuum drainage systems mm

主干管长度/ m	沿主管长度的人员密度/(人 $\cdot\text{m}^{-1}$)			
	<0.05	0.10	0.20	>0.50
500	100	100	100	100
1 000	100	100	100	150
1 500	100	100	150	200
2 000	100	100	150	200
3 000	100	150	150	250
4 000	100	150	200	250

2.2.2 气相实际速度的计算

由于提升段前端的低洼处气体的冲击,此处气液比相对较高,故其值取表1中相应范围的极大值。根据式(7)得到相应的气相实际速度见表4。可知除个别人员密度较高、主干管较长的情况外,气相实际速度均在 $6\sim 60\text{ m/s}$ 之间,符合环状流对气相速度的要求。因此,现有气液比的工程经验值合理。

表4 各主干管长度和沿管路人员密度所对应的气体实际速度

Tab.4 Actual gas-phase velocity in different vacuum drainage systems $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

主干管长度/ m	沿主管长度的人员密度/(人 $\cdot\text{m}^{-1}$)			
	<0.05	0.10	0.20	>0.50
500	40.83	42.82	45.68	45.68
1 000	39.38	40.83	42.82	55.95
1 500	38.27	39.38	50.01	60.55
2 000	37.40	38.27	48.23	57.75
3 000	36.11	45.80	46.87	62.27
4 000	34.84	44.22	52.89	60.51

3 结论

① 对气液比在真空排水系统设计中的影响因素和数值确定方法进行了分析,弥补了当前真空排水系统设计时,气液比经验取值法的理论不足。

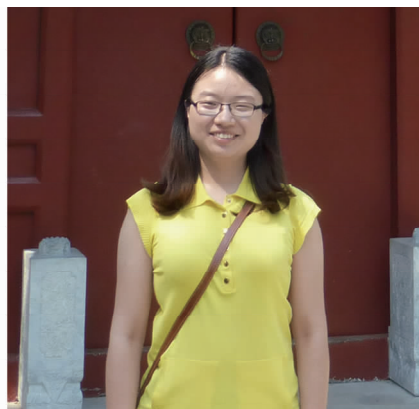
② 借助气液两相流理论中的含气率及相速度等相关理论,总结得到在锯齿型管道提升段前端低洼处的气相实际速度与气液比的定量关系,此处对

应的流型为环状流。

③ 借助推导出的气相速度与气液比的定量关系,对工程经验值进行合理性检验,发现若采用现有的气液比经验数值,则对于锯齿型的真空排水管网,能够保证提升段前端的低洼处形成环状流,从而保证系统正常运行。由此也证明了现有气液比工程经验值的合理性。

参考文献:

- [1] 李旻,徐江,苏珊珊,等. 室外真空排水技术在我国应用与发展的若干问题[J]. 中国给水排水,2015,31(16):1-5.
- [2] 李旻,周敬宣,温兴锁. 谈真空排水系统中的气液比及其与能耗的关系[J]. 给水排水,2010,36(12):69-72.
- [3] 李旻,周敬宣,温兴锁. 真空排水管网若干参数的说明及系统能耗分析[J]. 中国给水排水,2010,26(22):14-17,22.
- [4] 张佳杰. 室内和室外真空排水系统规范化设计研究[D]. 武汉:华中科技大学,2007.
- [5] 张健,聂璋义,李萌. 负压(真空)排水流体摩擦阻力的计算分析与探讨[J]. 中国给水排水,2012,28(24):14-17.
- [6] 范红兵. 真空排水系统标准化初步研究[D]. 武汉:华中科技大学,2007.
- [7] 吴巍. 管内汽液两相流动模型分析[D]. 重庆:重庆大学,2014.
- [8] 周云龙,洪文鹏,孙斌. 多相流体力学理论及其应用[M]. 北京:科学出版社,2008.



作者简介:姚越(1994-),女,陕西宝鸡人,硕士研究生,从事给水排水技术研究。

E-mail: yaoyue.0901@163.com

收稿日期:2016-06-11