

分相式气液两相流体等干度分配方法

张炳东, 刘丹, 王栋

(西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 提出一种新的气液两相流体等干度分配方法——分相分配法. 该方法的特点在于, 基于单相流体较容易实现均匀分配的特征, 首先通过强化两相流体在分配单元内的相分离, 将气液混合物分离成单相或接近单相的气体 and 液体, 然后以单相流的形式分别进行分配, 最后将分配后的单相气、液进行两两汇合, 完成两相流体的等干度分配. 在空气-水实验回路上对这种分配方法进行了实验研究, 结果表明, 在分层流、波状分层流、弹状流和部分环状流的情况下, 气液两相流体均能在分配元件内得到较好分离, 保证在单相或接近单相的状态下进行分配, 支路与主路间的平均干度偏差小于 1.6%.

关键词: 两相流; 分相; 分配; 等干度

中图分类号: O359 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2010)05-0106-05

Equal Quality Distribution of Gas-Liquid Two-Phase Flow Using Phase Separation Method

ZHANG Bingdong, LIU Dan, WANG Dong

(State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A new method for gas-liquid two-phase flow distribution, the phase separation method, was proposed. This method can convert two-phase flow distribution into single-phase feed in the distribution process of two-phase flow, and ensure an equal quality distribution. First, the mixture of gas and liquid is separated into single or near single phase fluids by enhancing phase splitting in a distributor. Second, the single gas and liquid flow are fed as required with liquid and gas mass flow rate meters, respectively. Third, each couple of gas stream and liquid stream is recombined in a branch. Experiments were conducted in an air-water multiphase flow test loop. The flow patterns in the experiments included stratified flow, wavy flow, slug flow and a part of annular flow. The experimental results show that the present phase separation method and apparatus could be feasible to complete equal quality distribution and the deviation of stream quality in different branches was less than 1.6%.

Keywords: two-phase flow; phase separation; distribution; equal quality

在石油、化工和能源动力等工程领域中常需要将气液两相流体分配到两个或多个支路中, 在分配过程中总希望各支路出口的两相流体具有相同的气液比例, 即按照等干度原则进行分配. 目前, 普遍采用的分配方法是让气液两相流体通过三通或集箱等普通的分配元件直接进行分配, 但这种分配方式往

往会产生较严重的相分离现象, 若不采取措施则会导致各支管的干度出现明显的差异, 影响下游部件和设备的正常工作, 降低设备的运行效率, 甚至导致传热恶化和爆管事故发生. 例如, 在核能发电中, 当电站内核裂变释放的核能使水汽化形成的汽水两相流, 在流动过程中一旦通过三通, 气液两相在支管与

出口管内的分配一般都是不均匀的,严重时,支管中可能出现全部都是气体的情况,这样很容易形成干烧而引发事故.因此,有关气液两相流体在分配元件内的相分离特性以及如何克服相分离现象,一直是多相流研究的一个热点和前沿性课题,也吸引了国内外大批研究者对此进行了一系列的研究.研究表明,在三通管、集箱分配器内流动的气液两相流体都存在较为严重的相分离现象,相分离的程度与入口的流型^[1-3]、干度^[1-2]、布置形式^[4-5]等因素有关.然而,在如何消除相分离方面的研究却进展不大. Azzopardi 等人^[6]曾试图在三通管内加装导向板等结构来改善相分离特性,但仅对分层流有一些效果,对其他流型不但无效,甚至还会强化两相流体的相分离.研究现状表明,至今仍没有专门适合两相流体的分配方法和元件,研究的思路大都局限在对单相流分配器的改进上.例如,目前常用的放射型分配器及其改进型^[7]就是想通过位置的对称性、流型的对称性等来改善两相流体的分配效果,但是这些方法并不能从根本上解决两相流体的等干度分配问题.

综上所述我们发现,依靠改善相分离的两相流分配方法有很大的局限性.相分离现象是两相流的一个固有特性,不论在分配器结构上采取何种措施,只要以两相共存的方式进行分配就不易达到等干度分配.分配元件的分离能力在一定的条件下可以得到加强^[8],由此本文提出一种与当前分配原理完全相反的分配方法——分相分配法.它不再是改善分配元件内的相分离特性,相反,是对分配元件内的相分离进行强化.基本原理是:利用普通分配元件的相分离特性,把气液两相混合物分离成单相或接近单相的气体和液体;以单相流的形式分别进行分配,再把分配后的单相气体和液体进行两两气液汇合;通过对系统的优化设计,利用自动补偿干度的方法,最终达到各支路出口干度一致的目的.这种方法可以克服上述传统分配方法的缺点,也为解决两相流分配问题提供了一种新的思路.

1 分相分配法的原理

本文以主管路中的气液两相流体分为 3 条支路分配为例来说明分相分配方法的原理,同样,此原理也适用于更多条支路.图 1 给出了分相式分配器的侧视示意图,图 2 给出了分配器气、液分配联箱部分的正视图(即图 1 左侧部分的正视图).气液两相流体从管道进入主管路,在不同的气液折算流度下,可以形成分层流、波状分层流、弹状流和环状流等.主

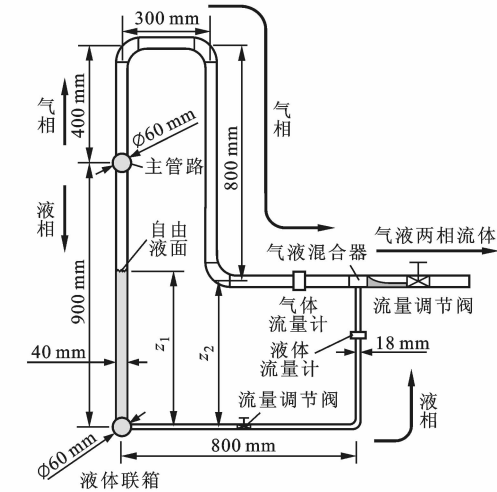


图 1 分相式分配器侧视示意图

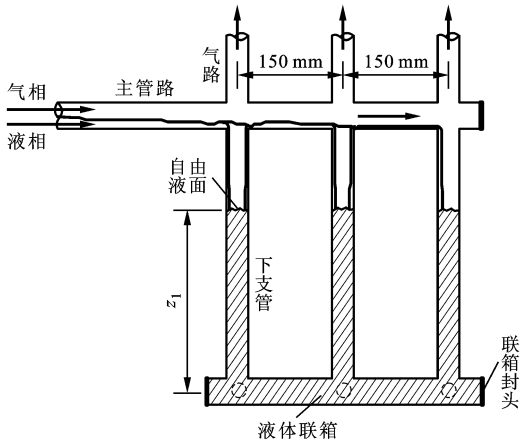


图 2 分相式分配器部分正视示意图

管路上布置了 3 个四通,当气液两相混合流体进入四通后,由于流体的惯性力与重力作用,大部分液相通过四通的下支管下降到液体联箱中,其余的液相沿着主管路流进下游的四通,通过下游四通的下支管下降到液体联箱内,而气体则进入四通的上支管.这样,气液两相混合物在四通中分离成为单相气与单相液.气相分别通过四通上支管进入各自的气路,完成了单相气的分配,然后通过气相流量计进行计量;液相通过四通下支管进入液体联箱,再从液体联箱中引出的 3 条支路中流出,完成了单相液的分配,并通过液量流量计进行计量.在同一竖直平面上的每条单相气支路与单相液支路分别两两汇合,形成气液两相流体各自流出,这就形成了 3 个支路出口的气液两相混合流体,完成了两相流体的分配.下面,从理论分析方面说明各支路出口气液两相流体的干度是一致的,并且与分配的支路数无关.

分相分配法的关键在于,分配器内部的气液两

相流体能够分离成单相或接近单相的气体和液体分开流动,能够形成稳定的流动机制,并且随着主管路的干度变化自行分配、调节出口的干度.这就要求系统具备足够宽的分相范围(适应一定范围的来流干度变化)以及保持气体回路与液体回路之间能够形成稳定的阻力平衡关系.由图1可知,在每一条支路上,分离后的气相与液相通过气液混合器合并为一定干度的气液两相流体,那么连接后的气相支路与液相支路就形成了一种关联关系.不考虑温度的影响,根据并联回路的性质,气体支路和液体支路的流动压力降应当相等,而压力降与流速的平方成正比,因此,在一定的结构、压力及干度下,气体流量和液体流量之间也成确定的比例关系,能够维持等干度分配.这种关系可以用下面的式子来表示

$$\sum \Delta p_G = \sum \Delta p_L = \Delta P \quad (1)$$

$$\sum \Delta p_G = \zeta_G \frac{1}{2} \rho_G u_G^2 \quad (2)$$

$$\sum \Delta p_L = \zeta_L \frac{1}{2} \rho_L u_L^2 \quad (3)$$

式中:下标G表示气相;L代表液相; ζ_G 和 ζ_L 分别表示气体回路和液体回路的总阻力系数; ρ_G 、 ρ_L 分别是气体和液体的密度; u_G 、 u_L 分别是气体和液体的平均流速.式(1)表示气体回路的总压力损失应等于液体回路的总压力损失.从式(1)~式(3)可以看出,只要调整阻力系数就可以实现阻力平衡,从而维持稳定的、分开流动的气体和液体.但是,当压力或干度发生变化时,气、液流量之间的比例又会发生变化,式(2)和式(3)随之发生变化,阻力平衡关系式(1)会遭到破坏,其后果是,气体侵入液体回路或液体流进气体回路.此时,必须改变结构参数(如阀门开度)才能重新建立平衡,但这是既不经济又很费时的.为了实现阻力平衡的自动调节,自动补偿压力和干度的变化,保持在各种条件下的等干度分配,需要对管路进行改进.改进的思路是,在液体管路上设置一段垂直管段,即在式(3)中增加重位压头 $\rho_L gh$,则有

$$\sum \Delta p_L = \zeta_L \frac{1}{2} \rho_L u_L^2 + \rho_L gh \quad (4)$$

式中: g 为重力加速度; h 为有效液位高度,即气液汇合点与自由液面的高度差.实际上,液体连通管就起了式(4)的作用.在图1中, $h = z_2 - z_1$,系统是通过增加气体分配集箱和液体分配集箱之间的高度差来形成重位压头的.

本文提出的分相式分配方法的关键就在于,引

入了有效液位高度 h .如图1、图2所示,当管路尺寸固定后,实际上有效液位高度 h 反映了混合物的干度,通过四通下支管内自由液面的上升或下降(即 h 值变小或变大)可补偿入口混合流体的干度变化.自由液面可能高于气液汇合点($h < 0$),也可能低于气液汇合点($h > 0$),它的位置取决于气液回路的阻力平衡情况.当入口干度增大时,气体流量相对变大,此时由于气体侧压力降增大会使自由液面降低,则 h 值变大,从而限制通过液相支路的液体流动,使汇合后的气水混合物干度升高,气液两回路又建立了新的阻力平衡,维持了系统的稳定工作.通过自动调节支路出口干度使之与主管路干度保持一致,从而实现自动调节功能.当入口干度减小时,类似地也会重新建立新的阻力平衡状态.下面用实验的方法来验证分相分配法的原理及分配装置的工作范围.

2 分相式气液分配实验系统

在空气-水实验台上对图1所示的分相式分配器进行了实验研究.实验段全部由有机玻璃制成,以方便观察.分配器主管内径为60 mm,长为500 mm,主管上所布置的3个四通的支管内径均为40 mm;下支管连接的液体联储是内径为60 mm的圆管,长为500 mm,由液体联储引出的液相支路内径均为18 mm.气相支路与液相支路布置在同一竖直平面上,3条支路之间的间隔为150 mm;气相支路先经过400 mm的上升段、300 mm的水平段后,下降800 mm,然后经过一段水平管连接在气液混合器上.主管路上四通的下支管长度为900 mm,连接在液体联储上.从液体联储引出的液相支路经过一段水平段后竖直向上与气液混合器相连.在每条气相支路、液相支路上,分别安装有孔板流量计,用于测量单相气体与单相液体的流量.实验段工作温度为23~36℃,工作压力为0.102~0.135 MPa.

3 实验结果

为了考核分配器在各种工况下的分配能力,本文在一定的流量范围内进行了实验研究,实验中包含了水平管道内气液两相流的基本流型:分层流、波状分层流、弹状流和环状流.

3.1 分配器内的气液两相流动特性

通过实验观察可知,当气相与液相折算气速都较低时,主管内气液两相为分层流,分配器上四通的分相效果很好,气相与液相单独流动,分离完全,分

配器可以很好地进行工作. 随气速提高,主管内气液两相形成弹状流,由于气相携带液滴能力增强,所以部分液滴进入气路并附着在管壁上,聚积形成液膜. 随着气液两相流体的波动,液膜始终处于上下跳动状态,但并不能随气体一起进入气体管路内,如图 3 所示,此时分配器没有受到影响,仍然可以正常工作. 当主管内折算流速约为 0.12 m/s、折算气速达到 12 m/s 左右时,液膜平衡遭到破坏,分离效果恶化,少量液体能够随着气体进入气体管路内,如图 4 所示. 在下支管中,由于液体的夹带作用,会有少量气泡被液体携带向下流动,气泡在液相中减速下降一段距离后会上浮出液位,并进入气路,气泡的直径小于 1 mm. 随着液相速度的加大,一部分气泡会一直随液体下降到液体联箱而不能返回气路,如图 5 所示.

3.2 气相与液相折算速度对四通分离能力的影响

由第 1 节对分相分配法原理进行的理论分析可知,只要分配器内气液两相能够分离成单相或接近单相的气体 and 液体,分配器即能实现等干度分配,即可以通过四通来强化分配器的分离能力,扩大分配器的工作范围. 本文首先通过改变分配器入口气相与液相折算速度,研究了分配器内四通对气液两相混合物的分离能力.

实验结果如图 6 所示. 图 6 给出的实验点是气液两相流体在四通内完全分离的临界点,在图中左下部分包含的区域,气液两相混合物在四通内可达

到较好的分离效果,分离后气相与液相各自通过气路与液路单独流动;在图中右上部分包含的气液折算流速区域,分配器未能将混合物分离成单相气与单相液,此时气体携带大量液滴进入气路,或者液路中流动的液体携带了大量的气泡,也可能两种现象同时发生. 在分离完全的情况下,主管路气相折算流速最大可达到 23.22 m/s,此时液相折算流速为 0.019 m/s,干度为 57.59%;气相折算流速最小为 4.86 m/s,此时液相折算流速为 0.12 m/s,干度为 4.22%.

3.3 分配器的等干度分配能力

实验研究结果表明,在图 6 所示完全分离区内,分配器的等干度分配效果良好,与理论分析基本一致. 同时我们发现,在利用四通进行气液分离时,流速较高则两相流体较难完全分离,分离出来的气相中不可避免地会携带少量的液体,而液体流中会携带少量的气泡. 只要所携带的液体和气体在流动过程中能够跟随气相和液相一起流动,不再发生相分离,那么就不会影响等干度分配,但是如果携带量过高,势必会影响气路和液路上流量计的正常工作. 表 1 给出了各种流型下分配器的等干度分配效果以及干度偏差,干度偏差定义为

$$D(X) = X_m - X_i$$

式中: X_m 为气液两相混合物入口干度; X_i 为各支路干度. 实验结果表明,在分层流、波状分层流、弹状流和部分环状流的情况下,气液两相流体均能在分配

表 1 各种流型下分配器的等干度分配效果

流型	支路编号	$W_{L1,2,3}/\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	$W_{G1,2,3}/\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	$X_{1,2,3}$	X_m	$D(X)/\%$
分层流	1	0.026 340	0.008 687	0.248 009	0.258 014	1.001
	2	0.025 002	0.008 426	0.252 064	0.258 014	0.595
	3	0.025 507	0.009 610	0.273 657	0.258 014	-1.564
波状分层流	1	0.061 373	0.012 535	0.169 603	0.163 167	-0.644
	2	0.067 455	0.012 212	0.153 288	0.163 167	0.988
	3	0.061 846	0.012 431	0.167 360	0.163 167	-0.419
环状流	1	0.094 170	0.015 879	0.144 290	0.142 310	-0.198
	2	0.090 979	0.014 743	0.139 451	0.142 310	0.286
	3	0.093 090	0.015 544	0.143 086	0.142 310	-0.078
弹状流	1	0.088 094	0.009 373	0.096 166	0.097 432	0.127
	2	0.087 210	0.009 625	0.099 393	0.097 432	-0.196
	3	0.083 549	0.008 945	0.096 713	0.097 432	0.072

注: $W_{L1,2,3}$ 为液相质量流量; $W_{G1,2,3}$ 为气相质量流量.

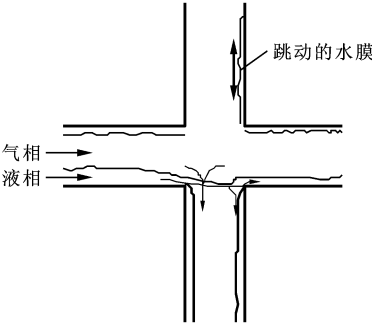


图 3 第 3 路上支管有水膜示意图

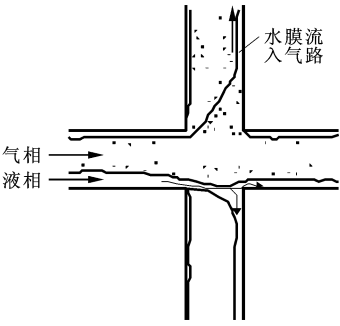


图 4 第 3 路上支管水膜进入气路示意图

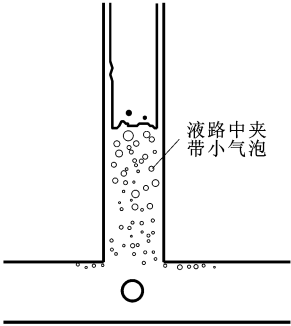
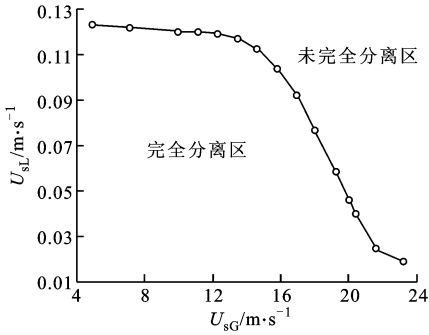


图 5 下支管液体夹带小气泡示意图



U_{sG} :入口气相折算速度; U_{sL} :入口液相折算速度
图 6 不同折算流速下的分离状况

元件内得到较好分离,保证在单相状态下进行分配.支路与主管最大干度的偏差小于 1.6%.

4 结 论

- (1)分相式气液两相流分配方法在原理上将两相流分配转化成单相流分配,通过强化相分离,避开了传统的依靠改善相分离而进行的两相流分配方法的缺陷,从而将较为复杂的两相流的分配问题转化成了较为简单的气液分离问题.
- (2)在主管道为分层流、波状分层流、弹状流以及部分环状流的情况下,实验装置可以达到较好的分配效果.由实验得知,各支路与主管的干度偏差小于 1.6%,同时发现,气路中携带少量的液滴和液路中携带少量气泡,都不会影响分配器的正常工作.

参考文献:

- [1] AZZOPARDI B J. Phase separation at T-junctions [J]. Multiphase Sci Technol, 1999, 11(4): 223-329.
- [2] AZZOPARDI B J. T-junctions as phase separators for gas-liquid flows: possibilities and problems [J]. Chemical Engineering Research and Design, 1993, 71 (A3): 273-281.
- [3] SHOHAM O, ARIRACHAKARAN S, BRILL J P. Two-phase flow splitting in a horizontal reduced pipe tee [J]. Chem Eng Sci, 1989, 44(10): 2388-2391.
- [4] AZZOPARDI B J, SMITH P A. Flow split at a T-junction; effect of side arm orientation and downstream geometry [J]. Int J Multiphase Flow, 1992, 18(6): 861-875.
- [5] FRYAR J R. Options are available for pipeline and compressor-station drip design [J]. Oil and Gas J, 1980, 78(13): 154-161.
- [6] WREN E, AZZOPARDI B J. Affecting the phase split at a large diameter T-junction by using baffles [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2004, 28 (8): 835-841.
- [7] 林宗虎, 王树众, 王栋. 气液两相流和沸腾传热 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2003: 242-244.
- [8] BAKER G, CLARK W W, AZZOPARDI B J, et al. Controlling the phase separation of gas-liquid flows at horizontal T-junctions [J]. AIChE Journal, 2007, 53 (8): 1908-1915.

(编辑 王焕雪 苗凌)