

含气液体流量测量的研究

纪纲 上海同欣自动化仪表有限公司 (上海 200070)

沈创谦 深圳烟草工业有限责任公司 (广东深圳 518109)

摘 要: 含气液体的流量测量, 严格地说是气液两相流的流量测量问题。气液混合物在管道内流动, 随着管道布置方向的不同, 流动方向的不同以及气液两相体积比的不同, 流动结构大不相同, 从而加大了对其流量进行测量的难度。含气液体的流量测量, 简单而又常用的方法是先做气液分离, 然后分别测量气相和液相的流量。对于所含气体为空气的对象, 常用消气器将气体分出, 然后排放掉。当含气量不多时, 常用气体收集器捕捉气体, 然后排放掉。列举了水中、凝结水中、液态化工产品中, 以及油品中含气的 4 个实例, 详细叙述了处理方法并对相关机理进行了讨论。实践证明, 尽管液体的性质不同, 工况条件多样, 但所采取的措施是行之有效的。另有一类测量对象, 也可转变思路, 化含气为不含气, 即根据含气率与其温度压力的关系, 合理选择流量计在流程中的安装位置, 避开含气问题, 具有异曲同工之妙。

关键词: 气液两相流; 流量测量; 流动结构; 消气器; 气体收集器; 溶解度; 电磁流量计

中图分类号: TH81 文献标志码: A

Research on Flow Measurement of Gaseous Liquid

Ji Gang Shanghai Tontion Automation Instrumentation Co., Ltd. (Shanghai 200070)

Shen Chuangqian Shenzhen Tobacco Industry Co., Ltd. (Shenzhen 518109)

Abstract: Flow measurement of gaseous liquid, strictly speaking, is the flow measurement problem of gas-liquid two-phase flow. The gas-liquid mixture flows in the pipeline, flow structure is very different with the different arrangement direction of the pipeline, different flow direction and the different volume ratio of the gas-liquid phases. It makes more difficult to measure the flow. The simple and commonly method for flow measurement of gaseous liquids is to separate gas-liquid first, then measure the flow rates of the gas phase and liquid phase separately. For objects whose gas is air, a gas eliminator is often used to separate the gas and then discharge it. When the gas content is not much, the gas collector is often used to capture the gas and then discharge it. There're 4 examples in the article of gas (steam) contained in water, condensed water, liquid chemical products, and oil products. Practice has proved that despite the different properties of liquids and various working conditions, the measures taken are effective. There is another type of measurement object, which can also change the way of thinking. Convert gas to no gas, according to the relationship between the gas ratio and the temperature and pressure. The installation position of the flowmeter in the process is reasonably selected, to avoid the problem of gas, with the same purpose.

Key words: gas-liquid two-phase flow; flow measurement; flow structure; air eliminator; gas collector; solubility electromagnetic flowmeter

0 引言

含气液体中的气体, 以均匀溶解于液体和以气泡形态游离于液体两种形式存在于液体中, 其中后一种形式, 对流量测量危害极大, 本文讨论的也是后一种形式。

含气液体的流量测量, 严格地说是气液两相流的流量测量问题。所谓气液两相流就是液体及其蒸气或组分不同的气体及液体一起流动的现象。前者称为单组分气液两相流, 后者称为多组分气液两相流。气液两相流在动力、化工、石油、冶金等工业过程中是常见的。

两相流的情况非常复杂, 首先其流动结构就很复杂。随着管道布置方向的不同, 流动结构大不相同。同样是垂直管道, 液体自下而上流动与自上而下流动, 它们的流动结构又大相径庭。而气体在液体中的体积比的不同, 对流动结构影响又非常之大。

有些液体本来并无可见的气泡存在, 但因工况变化, 会有一定数量的气体从液体中析出, 有的甚至会在瞬间产生大量的蒸气。因此人们在研究液体含气后对流量测量影响的同时, 也不能放弃液

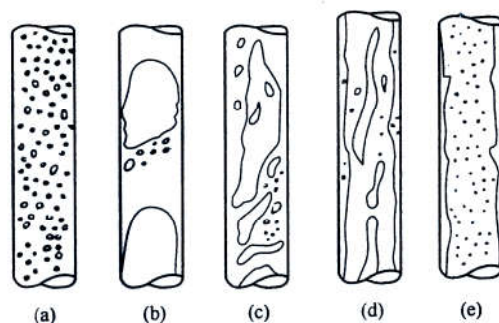
体中析出气体原因的研究和部分液体瞬间气化条件的研究。

本文在分析了气液两相流动的结构之后，论述了此类流体流量测量的常用方法，并列举了在仪表使用现场碰到的四个实例，分析了处理方法，最后得出结论。

1 气液两相流动的结构

含气液体在圆形管道中的流动结构，不仅与流动方向密切相关而且与流动速度和含气率密切相关。

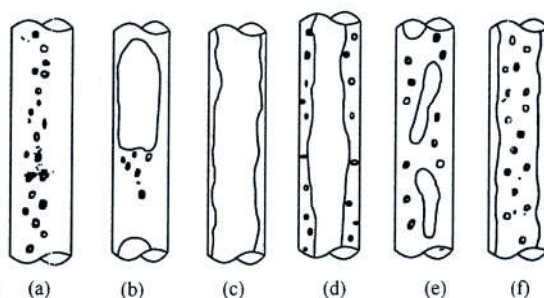
图 1 所示为垂直上升管中的气液两相流动结构。图 2 所示为垂直下降管中的气液两相流动结构。图 3 所示为水平管中的气液两相流动结构^[1]。



a—细泡状流动结构；b—弹状流动结构；c—块状流动结构；
d—带纤维的环状流动结构；e—环状流动结构

图 1 垂直上升气液两相流的流动结构

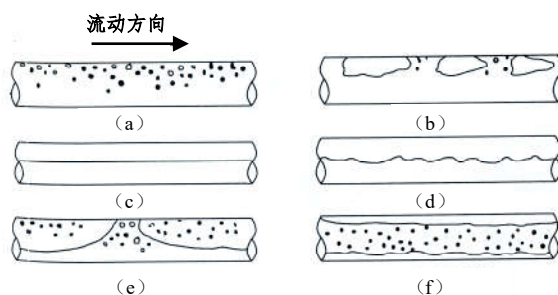
Fig.1 Flow structure of vertically ascending gas-liquid two-phase flow



a—细泡状流动结构；b—弹状流动结构；c—带下降液膜的环状
流动结构；d—带含泡下降液膜的环状流动结构；e—块状流动结构；f—环状流动结构

图 2 垂直下降气液两相流的流动结构

Fig.2 Flow structure of vertically descending gas-liquid two-phase flow



a—细泡状流动结构；b—柱塞状流动结构；c—分层流动结构；
d—波状流动结构；e—弹状流动结构；f—环状流动结构

图 3 水平管内气液两相流的流动结构

Fig.3 Flow structure of gas-liquid two-phase flow in horizontal tubes

在流动时，气相和液相之间还存在流速差，这更增加了测量的难度。

2 气液两相流体的流量测量方法

有几种仪表，制造商声称，可用来测量离散相浓度不高的两相流体的流量，来自用户的报道，也有一些成功应用的实例，但现行的流量计有关标准、规程规定，流量计都是在单相流动状态下评定其测量性能，现在还没有以单相流标定的流量计，用来测量两相流时系统变化的评定标准。

气液两相流体的主要测量方法有：先分离后测量；用消气器排除液体中所夹带的气体；用科里奥利质量流量计测量等。

2.1 先分离后测量

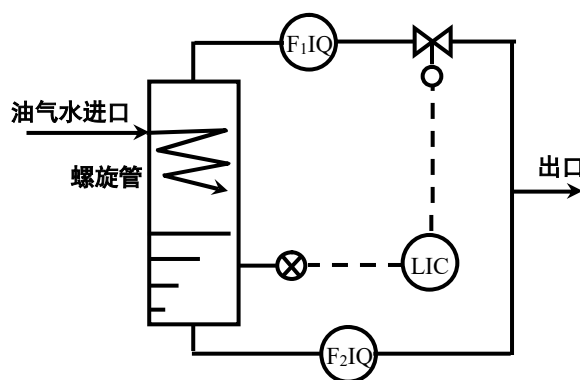
该方法是经分离设备将气液分离，然后分别测液相和气相流量。

图4所示为油田里使用最多的典型的基于螺旋管分离器的多相流量测量装置。该装置是为计量油气水多相流体而设计的^{[2][3]}。其主体是螺旋管复合气液分离器。中部为螺旋分离腔，上部为集气腔，下部为集液腔。

气液混合物进入螺旋管流道内产生强烈旋流运动。通过离心力使气体和液体进行分离。为了适应含气率和总体流量较小的工况，采用重力分离部分进行气液分离，从而缩小分离器体积，增强其适应能力，提高气液分离效果。

集气腔是空腔，近气体出口处设捕雾网。集液腔也是空腔，近液体出口处设防旋涡挡板。螺旋分离腔由腔体和内置多圈螺旋管组成，在螺旋管道内上侧开孔，分离出的气体从开孔处排出进入集气腔。在螺旋管道外下侧开孔，分离出的液体从开孔处排出沿腔体壁进入集液腔。当流体含气量很少或总体流量较小时，流体在螺旋管内流速较低，离心加速度较小，主要依靠分离器集气腔和集液腔进行分离。

在图4中，上部的气体出口管上装有气体质量流量计 F_{1IQ} ，下部的液体出口管上装有涡轮流量计 F_{2IQ} ，经计量的气体和液体从装置出口流出。为了将集液腔内的液位控制在理想高度，配置了液位调节系统，调节手段是气体排出量。



F_{1IQ} —气体流量计； F_{2IQ} —液体流量计；LIC—液位控制；

图4 基于螺旋管分离器的多相流量测量装置结构

Fig.4 Structure of Multiphase Flow Metering Device Based on Helical Tube Separator

国外厂商生产的气液两相流流量计更加复杂^[4]，而且价格可观。为了简化控制流程和降低成本，研究者根据两相流的具体情况，研发了简单而实用的方法，但是只适用于一些特定的对象和特定的工作条件。

2.2 用消气器排除液体中夹带的气体

原油大多采用容积式流量计计量。而原油在管道中长距离输送时，经常会析出一些气体。这些

气体如果不将其排除，在流过流量计时，势必就当作原油予以计量，最终导致计量结果偏高。更有甚者，原油管道在初次投入使用前都要用气体吹扫管道，在流量计拆下维修校验的操作中，也会有很多空气进入管道，因此需要将这些气体排除。这一任务通常交给消气器去完成。在采用容积式流量计组成的流量测量系统中，设计规范规定，消气器和过滤器是必须配置的辅助设备。定型的消气器如图 5 所示。由气液分离器、液位指示器以及排气阀等部分组成。其工作原理如下。

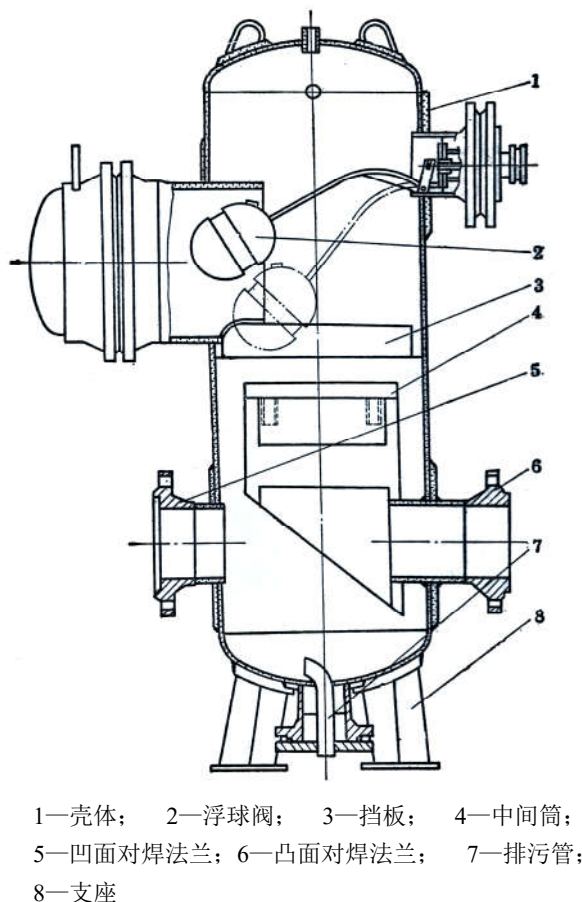


图 5 具有自动排气功能的消气器

Fig.5 Air Eliminator with Automatic Exhaust

在图 5 所示的消气器中，含气液体进入消气器，冲击在中间筒底的斜板上而产生涡流，由于涡流效应使小气泡聚集成大气泡，气泡的浮力使其上升到消气器的顶部空间，迫使容器中液面下降，以致浮球所受的浮力减小，浮球下行通过连杆机构将排气阀打开。随着气体的排出，液面上升，经浮球将排气阀重新关闭，从而实现自动排气^[5]。

消气器的应用应根据液体的种类、含气量的多少合理选定。当气量很少，只需难得排气时，可用手动排气阀代替浮球排气阀。这时消气器上应配有液位计，以便合理决定排气阀何时打开和关闭。如果气量再小，甚至可以用气体收集器代替消气器。

2.3 科里奥利质量流量计（CMF）方法

CMF 是以流过测量管的流体质量，所产生的科里奥利力为原始信号。而质量流量 q_m 等于体积流量 q_v 和流体密度 ρ_f 的乘积，当流体中含有气泡时，密度减小，所以，利用工况条件下的液体密度 ρ_{Lf} ，并根据气体（泡）的种类和工况条件，可以计算工况条件下的气体密度 ρ_{gf} ，从而计算流体中气液两相的体积比和质量比。

这一测量方法简单、直观，但含气率不允许太高，不同品牌的产品，该项指标差异也很大，早期产品含气率一般只允许 2%（V/V），最先进的水平允许 30%（V/V）^[6]，但价格昂贵，只在测量精

确度要求极高，其他类型的流量计无法胜任的情况下，才会选用。

下面举几个实例，分析判断液体中气体的形成以及将气体排除的方法。

3 含气液体流量测量现场处理实例

3.1 自来水分表比总表流量示值高

用科隆电磁流量计测量自来水流量，一年里大多数时间很准，但高温时间段，分表比总表走得快。

上海某大厦裙房五楼和三楼各装电磁流量计一套，四楼未装表，用差值法计算耗水量。

即：

$$Q_4 = Q_5 - Q_3 \quad (1)$$

式中： Q_4 为四楼用户耗水总量， m^3 ； Q_5 为五楼总表耗水总量， m^3 ； Q_3 为三楼用户耗水总量， m^3 。

自来水计量系统如图 6 所示^[7]。

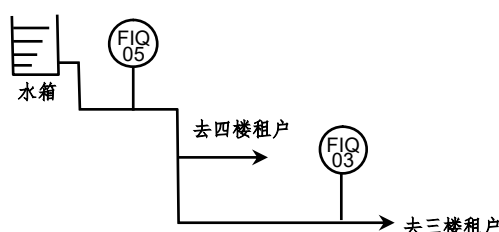


图 6 自来水计量系统图

Fig.6 Tap water metering system diagram

从计算机计量数据采集系统统计数据计算，以前几年，耗水总量统计结果属正常，但在 2010 年夏季上海最热的数天， Q_4 出现负值，原因是 $Q_3 > Q_5$ ，这个结论是错误的。

①三楼电磁流量计示值偏高原因分析

有关人员察看了现场，发现设在五楼的水箱，无太阳的直接照射，由自来水管网补水。水温较低，由于水箱是敞口容器，所以水中溶解的空气应已达饱和程度。沿途自来水管从大气中吸收热量，水温有所升高，尤其是在三楼处，有一段约 20m 长敷设在室外，温度升得更高，自来水流过此处进入三楼流量计处有气体从水中析出，聚集在水平管道的上部。这段管道到了三楼就再也没有上行的机会，所以水平管内积的气体排不出去。

安装在三楼水平管上的电磁流量计测量管内也难免有气体，占据一定的流通截面积，从而使流量示值偏高。

②整改方法

在三楼水平管的合适位置，增设气体收集器和排气阀，定期排放掉管内积气。秋冬春三个季节，管内不会积气，一般不需排气。整改之后效果良好。

3.2 流量示值逐渐降到零

①存在问题

上海某化工厂的一根 DN400 循环水管道，安装了一套阿牛巴流量计。由于工艺管道标高较低，检测杆从水平管道的上方插入，仪表投运后，流量示值正常。但随着时间的推移，流量示值逐渐降低，三天后，流量示值降到 0。从正压管最高点的气体收集器内排出很多气体。排尽正负压端气体收集器内积气后，仪表示值恢复正常，但数天后，又旧病复发。

②分析与改进

该台流量计的安装犯了一个错误，就是用阿牛巴流量计测量水流量时，阿牛巴检测杆应从工艺管道的水平直径的以下插入（如图 7 所示），这样，形成一段液封，从而使水中析出的气体无法钻入导压管内。

但实际安装如图 8 所示，水中析出的气体进入导压管内，并很快将导压管的正端装满，影响差压信号的准确传递。

为什么正压管气体收集器内空气容易积满？原因是正压管与阿牛巴检测杆的迎流面开孔相通。水在流过检测杆时，撞击在检测杆上，水中析出的气体从迎流面开孔钻入导压管，并因其密度小，而上升到气体收集器。

③ 水中的气体是从哪里来的

水中总是溶解有空气，循环水在用泵被送往用户之前，一般均经冷却塔冷却，并在曝气池内存放，与空气充分接触，所以，水中溶解的空气达到饱和程度。溶解在水中的这种空气，因输送过程中水温升高或其他原因，从水中析出，进入导压管，就要影响流量测量。

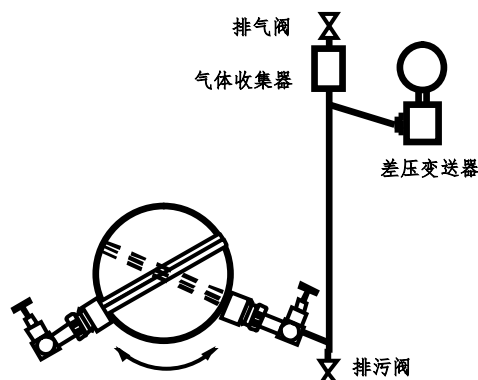


图 7 正确的安装方法

Fig.7 correct installation method

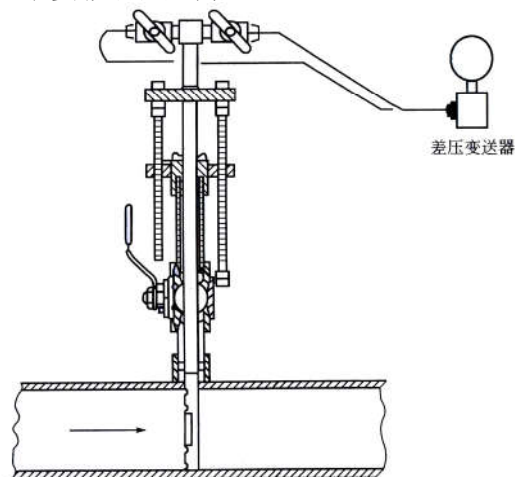


图 8 错误的安装方法

Fig.8 wrong installation method

④ 气体在液体中的溶解度

气体在液体中的溶解度不仅与气体的种类、液体的种类有关，而且与液体的温度及压力有关。例如在绝对压力为 $1 \times 10^5 \text{Pa}$ 的冷水中，空气的溶解度约为 2%（体积比，下同），温度升高后，溶解度减小[8][9]。

空气在液体中的溶解度与压力成正比，如冷水中当绝对压力为 $1 \times 10^5 \text{Pa}$ 时约溶解 2% 空气（在标准状态下），绝对压力为 $2 \times 10^5 \text{Pa}$ 则溶解 4%。在碳氢化合物中空气的溶解度要大得多，如绝对压力为 $1 \times 10^5 \text{Pa}$ 时，润滑油中约溶解 8% 空气，在煤油中为 12%，在汽油中为 16%，并且这个数值当温度升高时不会减少很多。溶解的空气当压力突然降至大气压时要释放出来，形成气泡，显著地影响测量精确度。这个问题在油品的计量中是一个严重的问题，必须设法解决以减少测量误差。

生活中也不乏溶解在液体中的气体被释放出来的例子。啤酒从冰箱里取出，往往看不出液体内溶解有气体，但啤酒瓶在餐桌上放置一段时间后，就可发现玻璃瓶内壁附着有很多气泡，这些气泡是因液体温度升高而被释放出来的。将瓶盖打开时有大量泡沫涌出，这是因为压力突然降低，溶解在液体中的气体被均匀释放，夹带着液体一起溢出所致。二氧化碳气体在啤酒中的溶解度要比空气的溶解度大若干倍，所以啤酒瓶中溢出的泡沫数量可观。

⑤ 整改效果

流量传感器按图 8 的方法安装也是不得已而为之，因为母管标高太低，后来不得不在传感器安装地点的地坪上挖了个大坑，按图 7 的方式改装。改装后测量正常，气体收集器内再也没有很多气体进入。从而使流量计得以长期稳定运行。

3.3 批量控制在冬季偏高 3%

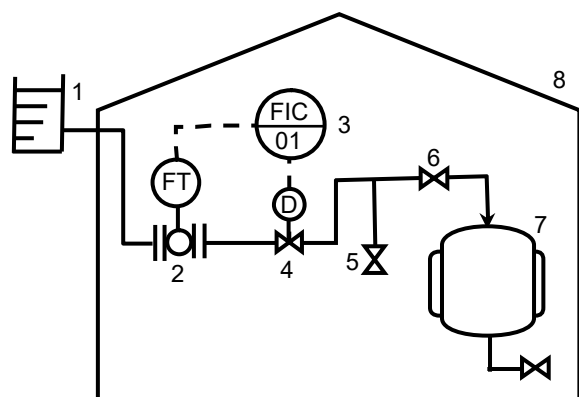
① 问题的描述

某工程塑料造粒厂，共有 4 条 PVC 塑料造粒流水线，其流程是将二丁酯增塑剂定量加入反应釜并预热，再将 PVC 粉料定量倒入反应釜，然后加热搅拌，待形成均匀熔融状态后，被输送到造粒

机，完成造粒。

该流程中与仪表有关的部分是增塑剂流量批量控制，如图 9 所示。

在图 9 中，储存在室外高位槽 1 中的增塑剂，经管道送往反应釜 7，并用流量批量控制器 3 实现批量加料。



1—高位槽；2—流量计；3—FBC10 批量控制器；
4—控制阀；5—校验阀；6—切断阀；7—反应釜；
8—厂房

图 9 增塑剂批量加料系统图

Fig.9 Plasticizer batch feeding system diagram

因为工艺规程规定，增塑剂与粉料必须保持规定的配比，而加入的粉料量是按包数计重的，很容易控制。所以操作人员每天都抽查增塑剂的控制精度，方法是关闭切断阀 6，打开校验阀 5，将液体排入敞口容器并称重。操作人员发现，春夏秋三季，控制得都很准，但在冬季，缺量 3% 左右，4 条流水线都是如此。业主单位怀疑流量计在冬季示值偏高。

②诊断与分析

现场诊断发现，增塑剂流出高位槽后，经 DN25 的管道在室内走了几十米的距离才到流量计。而管道和仪表的安装无不合理之处，智能化仪表的数据设置也无不妥之处，但在观察实际发料过程时，批量控制器上的模拟显示，每过几秒钟低落一次，显然瞬时流量曲线每过几秒就出现一个向下的缺口如图 10 所示，因此怀疑流体中有气泡存在，气泡夹杂在液体中从上游流向下流。当气泡流过流量计时，由于气泡密度比液体密度小很多倍，于是推力陡降，导致瞬时流量短时降低，从而出现向下的缺口。

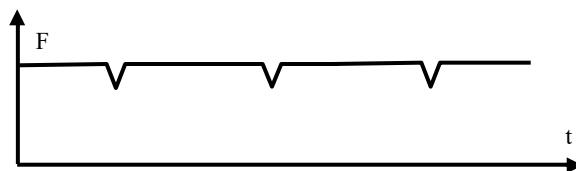


图 10 瞬时流量出现缺口

Fig.10 Instantaneous flow gap

进一步分析发现，室内空调开放，环境温度较高，而高位槽放置在室外，环境温度只有几摄氏度。室内外存在很大的温差。储存在高位槽中的增塑剂，与低温的大气长直接接触，将相当数量的空气溶解在液体中，其中一部分液体沿着管道流向反应釜，一边流动一边从管壁吸收热量，从而使其温度升高，空气在液体中的溶解度相应减小。从而析出空气形成气泡。

在炎热的夏季，室外温度比室内温度高，液体在管道内流动，温度只会降低，液体中能够溶解较多的空气，所以在流量计处不会有气泡出现。

③处理方法与结果

在图 9 所示的流程中,从原理分析,液体从高位槽流向反应釜,只要室内温度比室外温度高,管内液体就有析出空气的可能性,而环境温度每时每刻都是在变化的。因此,稳妥的办法是在流量计前的管道上安装一个气体收集器。不论什么时间,只要有空气析出,就悉数将其捕捉收集,然后定时排放到大气中。

实践证明,这个方法是有效的。所以几条流水线的流量计前面的管道上都加装了气体收集器,解决了问题。

除了此方法之外,此类测量对象,有时也可根据液体中的含气率与其温度压力的关系,合理选择流量计在流程中的安装位置,也能收到很好的效果。例如在本例中,如果在高位槽的出口,紧接着安装流量计,也就不存在液体含气问题,当然也就不为液体含气影响测量而担忧。这一方法在氮分离器、氨储罐出口流量的测量中,也是一条重要的要领。

3.4 电磁流量计总是指示满度

(1) 工艺流程

广东某卷烟厂在开展节能活动中,有一个项目,是将安装在地面上的板式换热器出口的凝结水,利用斯派莎克公司的疏水器背压,送到设在锅炉房二楼的回收热水槽。为了对回收热量进行核算,在回收管上安装了流量计,其流程如图 11 所示。

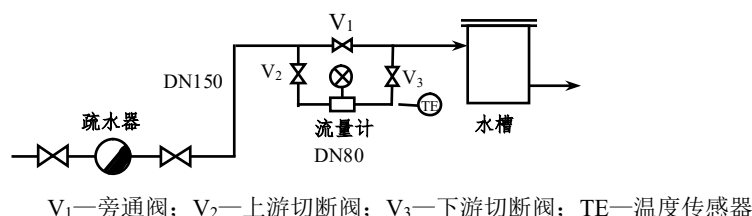


图 11 凝结水回收系统

Fig.11 Condensate Recovery System

为了不使疏水器背压升得太高,疏水器到回收热水槽之间的管道,直径放大到 DN150。为了减小阻力,回收水流量选用科隆公司电磁流量计,但此流量计投运后,示值超过满度,将其测量上限放大了 3 倍,流量示值仍超满度。对于 DN80 的电磁流量计,此时量程上限为 180t/h,而该厂三台燃油锅炉总的蒸发量才 30t/h,显然电磁流量计指示的流量值不正确,另有其他问题。

(2) 分析与诊断

①该厂的设计方案是合理的

该厂利用疏水器背压输送凝结水的方法是合理的,如果采用凝结水泵输送,除了增加泵、凝结水缓冲槽的投资外,还要考虑缓冲槽的水位控制。而采用凝结水背压输送,既节省投资又简化了操作和管理。适合距离不太远的输送。

②采用电磁流量计测量凝结水流量是合理的

在图 11 中,将阀 V₁ 关闭,电磁流量计就开始工作,不增加系统阻力。

③电磁流量计指示满度原因分析

校零试验:作者要求现场人员做电磁流量计校零试验,结果是,打开旁通阀 V₁ 并关闭流量计的上游切断阀 V₂,或者仅仅打开旁通阀,流量计示值均回零。显然,流量计工作正常。

怀疑蒸汽进入流量计:凝结水在从疏水器内排出之前,因压力较高,所以汽液相平衡温度也较高。例如压力为 0.6MPa G,温度约为 164℃。

凝结水从疏水器排出之后,由于突然减压,部分凝结水因闪蒸变成蒸汽,温度也随之下降。例如疏水器出口处压力为 0.1MPa G 时,温度降到 121℃。

凝结水在管内上行时,随着静压的逐渐降低,不断有一定量的凝结水被蒸发,因此,蒸汽逐渐增多。这些蒸汽在阀 V₁ 关闭之前,是在 DN150 水平管的上部流向回收热水槽。凝结水则贴在管道

底部流向回收热水槽。而当阀 V_1 被关闭后, 蒸汽只能与水一起, 经电磁流量计流向热水槽。

水和蒸汽的混物流过电磁流量计时, 电磁流量计的电极难免要被混合物中的蒸汽覆盖, 由于蒸汽导电性很差, 就使两电极之间呈高阻状态。因为两电极之间的电阻, 就是电磁流量传感器的信号源内阻, 内阻增大后, 受外界干扰, 使流量计输出指示满度^[10]。

综上分析, 电磁流量计指示满度是因蒸汽进入电磁流量计测量管。而蒸汽所以进入测量管, 是因蒸汽原有的通道被阻断。在无路可走的情况下, 只得与凝结水一起经流量计测量管流向回收热水槽。所以须给蒸汽另外提供一条通道。

在图 12 中, 增设一根 DN50 的蒸汽管, 从 DN150 的水平管道顶部通向回收热水槽。

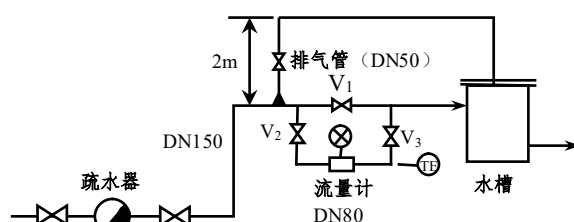


图 12 改进后的系统

Fig.12 improved system

在正常情况下, DN150 的水平管段并不充满凝结水, 但为了防止流量较大时, 由于电磁流量计及相关的 DN80 管的阻力引起 V_1 阀前压力有些许升高, 以致凝结水从 DN50 蒸汽管流向回收热水槽, DN50 蒸汽管设置 2m 高的龙门架。

管道经改装后, 电磁流量计指示正常。

4 结论

在过程控制和能源计量中, 含气液体的流量测量并不少见, 液体中一旦含有气 (泡), 便会对流量测量带来困难。

本文从流体的流动结构出发, 研究了液体含气后对流量测量的影响, 以及针对不同情况所需的不同解决方法。

含气液体的流量测量, 严格地说是属于气液两相流的流量测量问题。但是根据所含气体的种类和含气量的多少, 可采用简单的方法予以解决。

含气液体的流量测量, 简单而常用的方法是先做气液分离, 然后分别测量气相流量和液相流量。对于所含气体为空气时, 常用消气器将气体分出, 然后排放掉。当含气量不多时, 常用气体收集器捕捉气体, 然后定时排放掉。

气体在液体中的溶解度不仅与气体和液体的种类有关, 而且与液体的温度压力参数有关, 压力越高、温度越低, 溶解度越大; 反之越小。在做诊断分析时, 应对流体种类和温度压力变化做细致的调查, 仔细分析, 以求用经济而有效的方法解决问题。

从文中的几个实例可以得到一个启示, 即要解决含气液体流量的准确测量问题, 必须深入实际做充分的调查研究, 以求对被测液体物性和可能含有的气体的物性有足够的认识; 对管网的布置和所用流量计的特性有足够的认识, 然后做综合分析, 判断液体中是否含气以及含气率, 最后找出解决问题的简单而易行的方法。

在含气液体的流量测量中, 科里奥利质量流量计具有显著的优点。但含气率不能太高, 而且价格昂贵, 所以还有待进一步改进。

参考文献:

- [1] 林宗虎编著. 气液固多相流测量[M]. 北京:中国计量出版社. 1988.

- [2] 纪纲. 流量测量仪表应用技巧[M].第 2 版. 北京:化学工业出版社,2009. 111-117.
- [3] 国家质检总局计量司等组编. 2008 全国能源计量优秀论文集[M]. 北京: 中国计量出版社, 2008.
- [4] 潘丕武, 张明. 天然气计量技术基础[M]. 北京: 石油工业出版社. 2013. 477-484.
- [5] 朱德祥, 张廷柱. 朱福茂. 流量仪表原理和应用[M].上海: 华东化工学院出版社. 1992.276.
- [6] 纪纲, 武因超. 流量仪表现状与发展趋势. 自动化仪表, 2020, 41(7): 1-6.
- [7] 纪纲, 纪波峰. 流量测量系统远程诊断集锦[M]. 北京: 化学工业出版社. 2012.
- [8] 蔡武昌, 孙淮清, 纪纲. 流量测量方法和仪表的选用[M]. 北京: 化学工业出版社. 2001.
- [9] 中国石化集团上海工程有限公司编. 化工工艺设计手册[M]. 第四版. 北京:化学工业出版社. 2009.
- [10] 蔡武昌, 马中元, 瞿国芳, 王松良. 电磁流量计[M].北京: 中国石化出版社. 2004.

（本文源自《自动化仪表》2023 年第 2 期）