

涡流温度分离技术在天然气行业的应用

吕青楠¹, 张王宗²

(1 中国石油管道兰州输气分公司, 甘肃 兰州 730070 2 美国环球涡流设备国际公司中国办事处, 北京 100011)

摘 要: 涡流管又叫朗格—希尔茨效应管, 是一种结构简单而且能将压缩气体分为冷热两股温度不同气体的能量分离机械装置, 具有结构简单、温度变化范围大、无运动部件、免维护、使用寿命长、适应环境能力强、稳定可靠、节能、安全、环保等优点。着重研究涡流效应在天然气输配行业的加热效果及推广应用价值, 通过对涡流特性分析, 涡流温度分离结构的改进, 天然气输配系统运行特征分析, 得出涡流加热的优越性。虽然涡流技术已在很多工业领域得到广泛的应用, 但目前为止, 天然气领域的涡流技术应用依然处于起步阶段, 由于其独特的优势, 决定了涡流技术将在天然气行业有广泛的应用前景。

关键词: 涡流管; 朗格—希尔茨效应; 焦汤效应; 自适应; 外部能源; 能量转移; 涡流先导燃气加热器

文章编号: 1006-5539(2010)02-0037-06

文献标识码: A

1 概述

1.1 涡流现象简史

涡流现象是在 1928 年的一个相当偶然的发现, 法国物理学家乔治·朗格 (Georges J Ranque) 在做物理实验时察觉这一奇怪的现象, 在没有任何可移动零部件的简单装置里面, 同时出现了不同温度的冷、热空气, 因此他开始着手研究、开发这种颇具商业应用前景的装置, 然而, 他因研究没有获得实质性进展而沉寂了。到了 1945 年德国物理学家鲁道夫·希尔茨 (Rudolf Hilsch) 对这一现象进行了进一步研究和对涡流管改进, 取得了相当好的成果, 并于 1947 年发表了他的研究与改进成果的技术论文, 因此, 涡流现象广泛传播开来。后来人们为纪念这两位发现并研究涡流现象的科学先驱, 就将涡流效应称作朗格—希尔茨效应, 同时将产生这种现象的装置涡流管叫朗格—希尔茨效应管^[1]。

1.2 涡流管应用及发展

涡流管自诞生之日起, 就因为它独特的优点得

到了广泛的应用, 然而, 由于自身的局限性, 它的应用领域还是受到了限制, 因为, 人们对它的了解依然是有限的, 缺少更深刻、更具体的定量分析, 所以涡流管的应用更多局限于小功率、小规模制冷领域, 而对涡流管的制热效应的应用则很少有涉及, 篇幅有限, 在此不作过多涡流制冷领域的应用阐述。

1.3 涡流温度分离技术在天然行业的应用前景

涡流管既然同时具有冷、热效应, 我们能否将涡流效应应用于天然气行业普遍存在的消除因焦汤效应^[2]而产生的局部冻堵现象, 这个课题就成为天然气输配行业十分有意义的实践和应用探索。下面, 就涡流原理及天然气行业的应用问题作进一步说明。

2 涡流管的结构及基本原理

2.1 涡流管基本结构及工作过程

传统的双流涡流管由喷嘴、涡流室、冷端管、热端管、冷端孔板和调节阀组成, 如图 1 所示。

收稿日期: 2009-12-07

作者简介: 吕青楠 (1983-) 男, 山东郯城人, 工程师, 学士, 主要从事天然气输配设备、工艺及工程的管理、设计与研究工作。电话: (0931) 7666555-875。

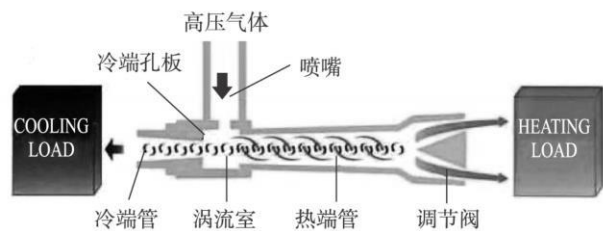


图 1 涡流管基本结构图

2.2 涡流管基本工作过程

高压气体从喷嘴处进入,经喷嘴内膨胀加速后,以很高的速度沿切线方向进入涡流室,如图 2 所示。气流在涡流室内形成高速涡旋,其转速可高达 $1.0 \times 10^6 \text{ r/min}$,经过涡流变换后产生温度的分离。处于中心部位的回流气流温度较低,由冷端孔板流出,形成冷气流;而处于外层部位的气流温度较高,从热端经调节阀流出,形成热气流,这一现象即被称为“涡流效应”^[2]。调节装在热端的针形调节阀可用于调节冷热流比例,从而得到最佳制冷或制热效应。

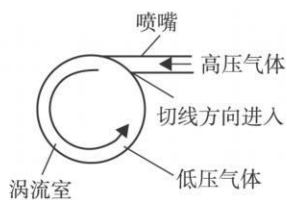


图 2 涡流气体走向示意图

由于涡流特殊的气动特征,就形成了明显的中间冷、外层热的能量(温度)分离现象^[2],这样,涡流管热端管道就泄出低压的高温气流,而且涡流管的外壁温度被热气流加温变得很高,同时,冷端则泻放出相当低温的气流。

在普通的绝热膨胀过程中,压缩气体原始温度 T_0 和膨胀后最终温度 T_f 关系如下:

a $T_f = T_0 - \Delta T_J$ (其中 ΔT_J 是焦汤效应降低的温度)

在涡流效应中,压缩气体经过涡流过程以后,最终温度分为冷 (T_L)、热 (T_H) 两个部分温度,其中, ΔT_V 是涡流管的涡流效应的增温,其温度变化关系如下:

$$b \quad T_L = T_0 - \Delta T_J - \Delta T_V$$

$$c \quad T_H = T_0 - \Delta T_J + \Delta T_V$$

从上述三个温度平衡式中可以看出,绝热膨胀过程中,只产生了一种降温效应 ($T_J < T_0$),而涡流

效应过程中,同时出现焦汤效应和涡流效应 ($T_L < T_0$, $T_H > T_0$),而且产生了明显的能量分离现象^[3]。在需要消除天然气焦汤效应的工艺要求下,我们必须使 ΔT_V 发挥最好(最大限度地减少 ΔT_J 在系统温度变化中的权重)^[3],因此,就必须对传统的涡流管的结构作相应的改进以达到制热效应的最大化。

3 涡流管热结构及加热方式的改进

涡流管特定的结构决定了其明显而有效的制冷和加热功能,但在一般情况下,涡流发生器的流道特征、涡流发生器的内腔几何特征、热管的长度、直径、涡流管内腔壁的处理方式、涡流管冷热端几何尺寸的比例等因素决定了涡流管能量分离的效率^[4]。在天然气应用上,如何将涡流管的制热效应发挥到最大化,是我们着重考虑的问题。首先,加热方式上,我们不能采用涡流管产生的高温天然气来直接加热消除因焦汤效应而产生的冻堵问题,因为,涡流管的处理功率有限,而且产生的热量占总处理气量的份额(热效比)有限,因此直接加热大量因焦汤效应而产生的低温天然气是不可能的,因此我们只能考虑间接加热,也就是利用涡流管的制热管的外壁热量来进行有效的热交换,这样达到加热效果。不但如此,我们还要解决涡流管的热端产生的热气走向问题,因为天然气行业是不允许有任何气体泄露的,我们不能因为加热而泄放炽热的天然气。其次,涡流管通常是减压状态下工作的,因此焦汤效应和涡流效应叠加的结果是制冷量大于制热量,也就是其热效相当有限,我们如何来通过改善涡流管的几何特征来提高涡流管的热效以满足我们的加热需要。最后一个问题就是,涡流管是一个减压能量分离装置,我们如何解决减压过程中的焦汤效应而造成的涡流管本身的减压冻堵问题^[4]。为此涡流管的结构因天然气加热的特殊性必须作两个阶段的改进。

3.1 双流涡流管向单流涡流管的演化使涡流管热管壁的温度比原来的管壁温度更高

因为传统意义上的双流涡流管运行时很大一部分热量散发是通过热端的涡流热气散发(如图 3),我们对热端进行减小热气散失的处理(局部封堵^[5]),可以将原来散失的大部分热量转移到热端管的管壁^[5],这样,由于涡流效应过程的连续累积

和强化,势必造成涡流管热管管壁温度的大幅度上升,这与传统的双流涡流管相比,涡流管热端管壁的温度大大提高,从而给我们需要的壁式热交换提供更有效的可能性^[6],改造后的单流涡流管原理图与结构示意图如图 4

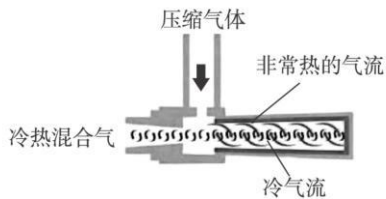


图 3 全封堵涡流热量分布示意图

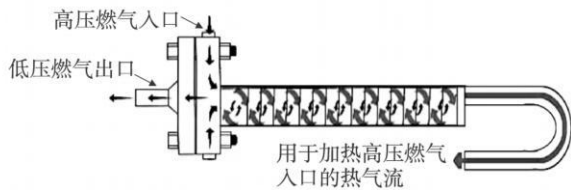


图 4 局部封堵涡流热量分布示意图

3.2 解决涡流管本身的减压冻堵问题是涡流管能否连续正常工作的关键

因为天然气是多种烃类、水份和其他部分杂质组成的混合物,因此,在输配过程中的剧烈减压时,部分物质因为露点很高,容易因冷凝造成液化和固化,这样势必造成涡流装置本身在工作时产生严重的冻堵,为了解决这个问题,我们从涡流管热端取出部分涡流热气来加热涡流管这个容易冻堵的减压口(涡流管本身的涡流气入口)。这样通过以上两个程序的改造,传统意义上的双流涡流管就变成了自热型单流涡流管。改造后的自热单流涡流管原理图与结构示意图如图 5。

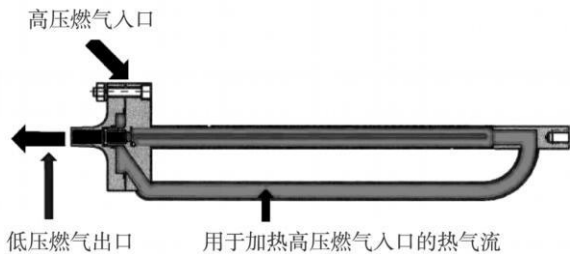


图 5 单流无冻堵涡流管结构原理图

4 涡流先导燃气加热器 (VPGH) 的形成

在天然气输配过程中,因减压膨胀吸热(焦汤

效应)而造成主输配干线冻堵的情况并不多见,因为主管线管径很大,而且天然气输配主管线中调压阀开度一般都很大,在调压阀打开瞬间虽然出现剧烈的温降过程,但因为巨大的压差和强烈的气流冲击,因此主干线虽然有温降现象但不至于产生严重的冻堵现象,但是,对于先导气的情况就不一样了,由于上下游压差很大,加之先导阀的引压管管径较小,先导气的气流量也很小,因此,只要焦汤效应条件存在,就极易出现冻堵现象,这样就容易造成调压过程处于严重的失控状态,所以,传统的办法使用外界能源对先导气进行加热^[7],如安装电加热棒,缠绕电伴热带。在此,我们则采用的是涡流先导燃气加热器。如上文所述,在解决了涡流制热效率、加热方式和涡流管本身冻堵问题以后,我们就可以将这样的涡流管进行进一步改进成可以直接给先导气加热的设备——涡流先导燃气加热器(Vortex Pilot Gas Heater, 简称 VPGH^[7])。改造后, VPGH 的加热原理和结构示意图如图 6~7。

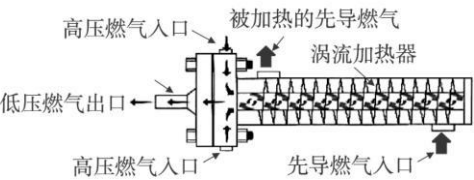


图 6 VPGH 加热原理示意图



图 7 VPGH 加热结构示意图

VPGH 按加热通道的数量可分为单通道涡流先导燃气加热器 (VPGH-SP) 和双通道涡流先导燃气加热器 (VPGH-DP), 下面我们使用最广泛的双通道涡流先导燃气加热器 (VPGH-DP) 为例来说明涡流先导燃气加热系统。

5 先导气加热系统简介

5.1 原有的天然气调压站的前导式调压阀加热系统

在涡流先导燃气加热器 (VPGH) 没有诞生以

前,传统的先导阀指挥器的加热是采用介入外界能源加热,加热方式多为使用电伴热带(如图8)、电加热棒(如图9)或者电加热带和加热棒同时加热的方式。

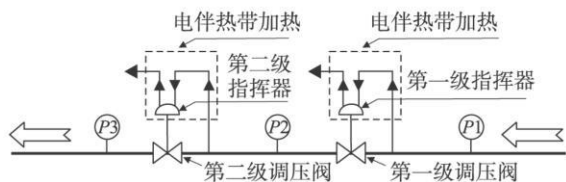


图8 电加热带加热先导燃气示意图

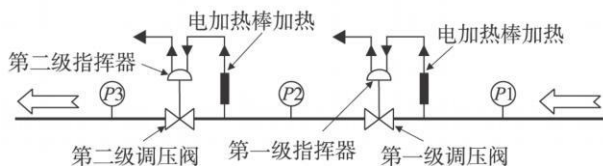


图9 电加热棒加热先导燃气示意图

传统的电加热虽然有效地解决了先导式调压阀的指挥器减压冻堵问题,但有局限性。

电加热设备(电加热带、电加热棒)需要外接电源,不节能,而且加热过程中存在故障隐患,需要维修、维护,且这些隐患不易发现,从而增加了工作人员的工作量。此外,电加热设备的工作功率恒定,不会因为调压阀上下游压力波动而自动调整加热功率以适应先导阀指挥器的焦汤冻堵情况。

5.2 涡流先导燃气加热系统(带有VPGH的先导燃气加热系统)

安装有涡流先导加热器的加热系统接线原理见图10。

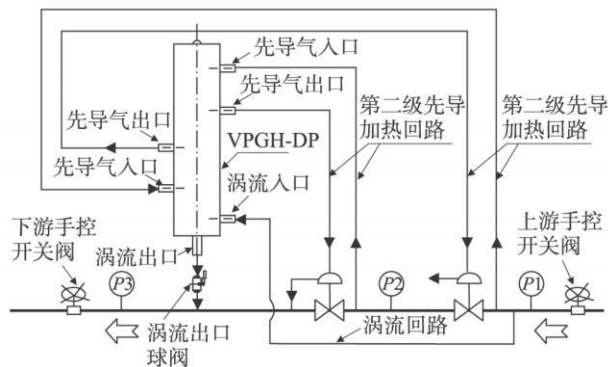


图10 带有涡流先导加热器的加热系统接线原理图(不含过压保护)

在这个系统接线图10中,涡流回路的上、下游压力差是VPGH热量的来源。首先,VPGH将本来经由调压阀的部分天然气压力差势能分离、转化成热能、冷能,也就是将本来在调压阀中转化的能量进行分流、转化、分离,在这个转化与分离能量过程中,冷的能量只是很小的一部分,也就是说,与管道本身的冷量相比,这只是一小部分冷能,这部分冷的能量直接泄放到下游管道,而热的能量在VPGH中累积,再使用先导气流将其在VPGH中交换出来,这样就达到了给先导天然气加热的目的。在这个能量的分离、转化、交换过程中,整个先导气加热系统没有使用任何外部能源,而且这种能源的分离、转化、交换过程全部都是在系统内部进行的物理过程,没有任何化学反应、没有任何移动零部件的物理过程,整个系统的能量守恒,经过加热的先导气经由先导阀指挥器以后直接由引压管泄放到下游管道,这样,下游主干线的天然气温度不会因少量的涡流出口的低温天然气而大大降低下游系统的天然气温度,不会影响主干线天然气的温度。其次,如图10所示,调压阀上、下游的压力如 P_1 与 P_2 之间的压力差发生改变时,第一级先导阀指挥器内的焦汤效应将会改变,相应的,VPGH也因 P_1 与 P_2 之间的压力差发生改变,这样VPGH的热效应将发生改变,这也就意味着VPGH的加热情况会自适应^[9]跟踪先导阀的焦汤效应的状况。这也就是说VPGH的加热状态是动态跟踪焦汤效应的加热状态。对于第二级调压阀(P_2 与 P_3 之间),原理也是一样的。需要指出的是,虽然持续不断的涡流热量在涡流设备的外壁累积,使涡流设备的外壁温度不断升高,但这种温升是有限度的,而且不可能超越天然气行业所要求的安全防爆极限温度(Exp IV所要求的 130°C 以上)。因为,VPGH的热效应是一种动态效应(热量的产生与交换是同步、动态过程),也就是说VPGH的温度升高的同时,强烈而高效的热交换将同时进行,所以,VPGH涡流装置中热量累积而达到的温度无法超越安全防爆极限温度。再一个原因就是,在静态条件下(一部分先导式自立调压阀指挥器在上下游压力不波动的情况下,先导气是静止不流动的,例如DRESSER公司的MOONEY先导阀),涡流热量会随涡流气的流出而直接散发到下游,涡流结构的管壁温度也不会超过Exp IV所要求的极限温度,因为VPGH是利用单流涡流管来产热的,一部分热量会

因先导气的静止状态而泄放到下游。因此,无论在先导气是流动的或者静止的状态下,VPGH的存在,其内部涡流部分不会产生危及天然气行业所要求的安全防爆极限温度的高温。

上面的加热过程是针对常通状态下的先导阀指挥器而言,一些品牌的先导式调压阀的指挥器,在上下游压力无论是波动或者恒定状态下,其压力比较部分都是导通的状态(这种情况占到目前情况的90%以上),也就是说,先导气气流一直存在,任何时候先导阀指挥器都不会关断先导气流。然而,还有一类先导阀(如DRESSER公司的MOONEY先导阀)则不是这种情况,这类先导阀指挥器则是在上下游压力有波动时导通,这种情况下,在上下游压力恒定时这种先导阀指挥器则处于静止关闭状态,这时VPGH的热能则在其内部累积并传导到涡流气,这时的涡流气温度就相应提高,而当压力出现波动也就是指挥器开始出现打开而出现焦汤效应时,VPGH立即释放热量来加热指挥器,这充分体现了VPGH及时动态加热的优势。

一般情况下,在连续运行的调压站中,标准的VPGH加热系统不需要安装过压保护回路,因为在先导阀打开的情况下,对于下游有任何微小的压力波动,先导阀会自动调整开度来控制下游压力,使下游主干道的压力趋于平稳状态,但在间断运行的调压站中,就有可能需要加装压力保护回路,因为,在安装了VPGH以后,其涡流回路的存在就相当于调压撬上加了一个直接跨越两级调压阀的旁路,在这种情况下,如果操作人员在间断运行时出现误操作,仅仅关断下游截断阀而没有关断上游的截断阀,而且也没有关断VPGH涡流出口球阀,那么上游的压力将通过涡流回路直接传输到下游,那样容易导致下游主干道压力上升。因此,在这种特殊情况下需要在涡流回路上加装压力保护装置,其接线示意图如图11。

在带有压力保护回路的VPGH加热调压系统(图11)中,如果下游压力因涡流回路的未关闭(涡流出口球阀)而出现下游压力升高时,控制回路的控制阀(例如FISHER627M)就会自动关闭,这样,就保证了调压系统在停止运行时,下游压力不因涡流回路而出现过压状态。

以上就是带有VPGH加热调压系统的原理及系统接线的全部情况简介,在这个系统中,VPGH加热的介入,没有改变原系统运行的特性。

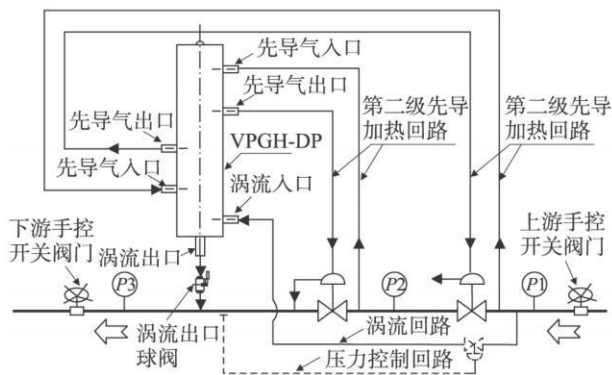


图 11 带有涡流先导加热器的加热系统接线原理图(含过压保护)

5.3 VPGH安装注意事项

VPGH在安装过程中容易出现以下问题,因此针对这些问题,我们要注意以下几点:

a VPGH产热情况是否良好取决于涡流回路的安排,这里要注意的是涡流入口以及出口的管道的管径、长度与涡流气的采集点,如果天然气含有太多杂质的话,还要考虑是否采用燃气过滤器的问题,虽然这种情况并不常见。

b VPGH下游涡流气出口管道的长度、管径需要合理安排,同时考虑到调压站运行情况考虑是否加装球阀来保证 VPGH运行/关闭状态的切换。

c 先导气加热回路管道的管径、长度决定换热效果和热量丧失的情况,因此需要合理安排。

d VPGH在系统中的相关管道连接件情况将影响其运行效率。

e 考虑到 VPGH加热系统的季节性变化,因季节温度情况的不同,可以适当手动调节 VPGH涡流出口球阀的开度,而且对于运行参数不同的调压站及品牌、型号不同的调压装置,选择涡流出口球阀开度也不相同。

f 对于 VPGH-DP而言,其先导加热回路的选择还需考虑现场调压器的分布和调压器参数设置情况,因为 VPGH-DP两个加热回路的加热效率有差异,也就是说 VPGH-DP内部因加热回路的不同,其热量分布不同。靠近涡流回路的为第一级,热量分配相对小;顶端回路为第二级,热量分配相对较大。有一种情况就是:在整个系统中调压器预置参数差别很大,主调压器(工作阀)上负荷大(压差大),监控调压器(监控阀)上压差小,因此,它们的指挥器上的焦汤效应有明显差别,这就需要我们更加合理

的安排加热回路,也就是将第二级加热回路使用在加热工作阀指挥器上。如果两个加热回路的加热效率相差太大,我们一个解决方法就是在不改变输配工艺条件下调整两个调压器上的预置参数(这个调节范围不能太大,否则会导致线路运行不稳定),使两个参数值之间相差变小,这样加热和热交换效果就会改变。另一个方法就是倒换第一级、第二级加热回路。

6 结 论

综合以上简介和 VPGH本身的特性,我们可以得出带有 VPGH加热系统带有十分明显的优越性,对天然气管道调压站进行 VPGH加热改造能真正体现安全、环保、节能等优越性,因而 VPGH的推广应用十分必要。

正是基于以上原因,我们认为, VPGH是天然气输配系统中调压设备先导气加热环节的十分优秀的附属加热设备,它必将在这个领域中发挥十分

重要的作用。但应注意,在安装 VPGH时需要调压设备专业工程师配合指导安装,以免影响调压设备的正常运行。

参考文献:

- [1] 张王宗,李保华. 涡流制冷方式在工业领域的应用[J]. 洁净与空调技术, 2006(3): 51-53
- [2] 李 玮,刘衍平. 涡流管原理及其在天然气行业的应用[J]. 燃气设备采购, 2007(1): 23-27
- [3] Lev Tunkeļ Krasovitsk Boris Method for Energy Separation and Utilization in a Vortex Tube Which Operates With Pressure Not Exceeding Atmospheric Pressure [J]. US Patent Issued on October 8 1996
- [4] Lev Tunkeļ Vories Pilot Gas Heater [J]. WO/2000/003186
- [5] Dr Lev Tunkeļ Krasovitski Boris Vortex Pilot Gas Heater [J]. US Patent 6082116
- [6] Dr Lev Tunkeļ Method of Heat Transfer Enhancement in a Vortex Tube [J]. US Patent 5911740
- [7] Lancelot A Fekete Vortex Tube Separator May Solve Energy Limitations [J]. World Oil Aug 23 2007.