

耐强腐蚀弯管流量计的研发和应用研究

邵林, 刘畅 营创三征(营口)精细化工有限公司(辽宁 营口 115003)

纪波峰, 纪纲 上海同欣自动化仪表有限公司(上海 200070)

摘要: 在三聚氰氨生产过程中, 需对进聚合反应器的氯化氰单体的流量进行较准确的测量。由于该气体温度不宜太高, 而且其熔点与沸点靠得很近, 所以极易结晶。以前曾经试验用耐腐蚀型孔板流量计和楔形流量计测量该流量, 均因法兰膜片隔离式差压变送器的膜片上结晶物堆积, 测量灵敏度丧失而宣告失败。后来改用吹气式弯管流量计, 获得成功。这种流量计为非标差压流量计。出厂前放在空气流量标准装置上实流校准, 在 $Re_D \geq 7000$ 后, 能达到 $\pm 1.5\%$ 的准确度。在工艺流程中的使用实践表明, 其耐腐蚀性、抗结晶能力以及准确度、稳定性、可靠性, 能够适应严酷的工艺条件, 满足生产要求。与氯化氰气体具有相似特性的介质, 均可借鉴本方法。

关键词: 弯管流量计; 腐蚀结晶气体; 流量测量; 喷涂 PTFE; 仪表吹气

Development and application research of strong corrosion resistant elbow flowmeter

Shao Lin, Liu Chang Yingchuang Sanzheng (Yingkou) Fine Chemicals Co. Ltd.(Yingkou 115003)

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

Abstracts: During the production of cyanuric chloride, flow rate of cyanogen chloride monomer entering the polymerization reactor needs to be more accurately measured. Because the gas temperature should not be too high, and its melting point and boiling point are very close, so it is easy to crystallize. Corrosion-resistant orifice flowmeters and wedge flowmeters have been used to measure the flow rate in the past, they all fails due to the loss of measurement sensitivity result from the accumulation of crystals on the diaphragm of the flange diaphragm-isolated differential pressure transmitter. Later, blown-type elbow flowmeter has been trialed, which was successful. This is a non-standard differential pressure flowmeter. Calibration should be done on the air flow standard device, at $Re_D \geq 7000$, accuracy of $\pm 1.5\%$ can be achieved. Practice in the process shows that its corrosion resistance, crystallization resistance, accuracy, stability, and reliability are able to adapt to harsh process conditions and meet production requirements. The medium with similar characteristics to cyanogen chloride gas can be used for reference in this method.

Key words: elbow flowmeter ; corrosion crystallization gas ; flow measurement ; spray PTFE; meter blow

1. 概述

三聚氰氨是一种重要的精细化工产品, 具有广泛的用途, 主要用作农药工业的中间体, 是制造活性染料的原料。

在三聚氰氨生产过程中, 需要对进聚合反应器的氯化氰单体的流量进行较准确的测量。

氯化氰流量的测量难度极高。困难在于介质遇水分解为盐酸, 具有极强的腐蚀性。氯化氰由于沸点较低, 而且与熔点靠得很近, 极易液化和结晶而堵塞流量传感器差压信号传输通道甚至堵塞节流件本身。这是因被测流体的物理特性引起的。在工艺流程中, 进入反应器的氯化氰的温度是被严格控制在环境温度以上的适当数值, 气体处于过热状态。但在寒冬腊月, 管道自然散热等因素会使某些部位的气体低于最佳温度。如果流程短时停车, 则会使局部温度跌入饱和状态, 甚至使氯化氰结为固体, 粘附在仪表及管道内壁等部位, 影响流量测量。

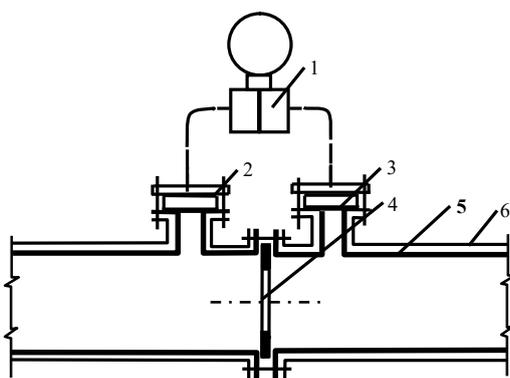
氯化氰气体物性很特殊, 在大气压力条件下, 13.1°C 就凝结为液体, 温度再降低 6.6°C 即低于 6.5°C 就结晶, 因此, 操作时须小心翼翼。

2. 曾经试过的方法及效果

2.1 解决腐蚀问题的方法

腐蚀性介质对仪表的腐蚀以及解决这一问题的方法，几十年来一直成为很多研究者的课题^[1]。对于腐蚀性气体的流量测量，几十年来标准孔板一直占有统治地位，但是早期的差压变送器，还没有解决耐强腐蚀问题，仪表用户只能采用隔离液将差压变送器的敏感元件与腐蚀性介质隔开。这个方法有一重大风险，即由于操作失当或隔离液泄漏导致隔离液损失，进而引发测量误差，甚至引起腐蚀性介质侵入变送器，以致仪表损坏。

自从钽膜片法兰膜片隔离式差压变送器、压力变送器面市后，设计人员大多已放弃用隔离液防腐的方法，而采用既有效又可靠的钽膜片隔离的方法^[2]。例如在三聚氯氰生产过程中，工艺设备专业全面采用内衬 PTFE 管道，自控专业设计的流量测量方法是，在衬 PTFE 法兰之间，夹上一片哈氏 C 材质的标准孔板，在孔板前后的管道上，预留好 DN50（或 DN80）法兰管口，然后装（钽膜片）法兰膜片隔离式差压变送器即可^[2]。而介质压力测量，方法与差压测量相似。但是运行结果表明，这一看上去无暇可击的方法对于氯化氰流量来说却失败了。因为过不了多久，在孔板前后的角落里以及法兰膜片隔离式差压变送器的膜片上就结满晶体和自聚固态物质。以至无法使用，孔板和取压口示意图如图 1 所示。经分析，自聚物堆积堵塞的原因是，孔板等死角处流体流速太低，给粘稠的固态物质的沉积创造了条件。而隔离膜片表面结晶，则是因为变送器测量头是一个尺寸较大的金属块，而且被置于法兰管口处，流体无法为其提供较多的热量，以致环境温度较低时，膜片温度太低，为结晶创造了条件。



1—双法兰差压变送器；2—测量头；3—聚四氟乙烯垫片；
4—耐腐蚀孔板；5—工艺管道内衬；6—工艺管道
图 1 耐腐蚀节流式差压流量计在衬 PTFE 管道上的安装

为了改变孔板前后聚积结晶物的问题，曾经试验用楔形流量传感器的方法^{[3][4]}，如图 2 所示。死角虽比孔板方法好一些，但是死角还是存在的。运行实践表明，结晶物堆积仍然很严重，也不能长时间使用。

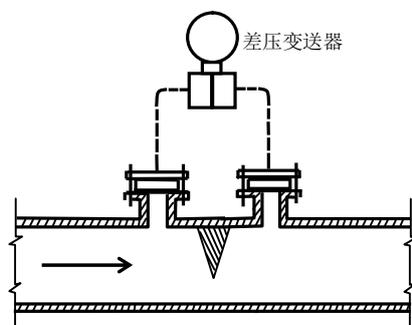


图 2 用楔形流量计测量腐蚀性介质流量

2.2 结晶与结垢物的形态及对流量测量的影响

安装在工艺管道上的孔板节流装置、楔形流量传感器以及法兰膜片隔离式差压变送器测量头，

在工况条件下使用一段时间后，就会在波纹膜片上积满结晶体及自聚生成的污垢，在所有的角落处，也都堆了此类固体，使流体的流路改变了正确的轨迹，从而导致传感器的流量系数发生变化，产生流量测量误差。威胁更大的还不止于此，因为变送器测量头的隔离膜片上结了厚厚的一层固体后，就失去了压力传递的灵敏度，以致在结垢初期，表现为流量示值的漂移。随着结垢程度的加重，流量计显示的流量值完全不随管道内流体流量的变化而变化。这些结晶物和聚合物从仪表维修的角度可以想办法清除，但是有两个困难，一是角落处很难清理干净。二是隔离膜片太薄，大约只有 100um，又布满环形波纹，一不小心就导致变形损坏。所以仪表维修人员怨声载道，最后弃之不用。

3. 耐腐蚀抗结晶弯管流量计的研发

市场上能买到的流量计据说有一百多种，而且每年都还有新型流量计问世。即使如此，到目前为止仍有很多测量任务没有解决或没有很好地解决^{[5][6]}。之所以这样，是因为流量测量的多样性和流体的复杂性。

在这一百多种流量计中，每种流量计都占有一定的市场份额，这是因为每一种流量计都有自己的优势，这种比较优势相对于其他种类流量计构成竞争力，此竞争力一旦消失，这种流量计就会被淘汰。

耐腐蚀抗结晶弯管流量计就是为了解决此类介质的流量测量问题而研制的。

3.1 传感器的研发

在这种流量计的传感器中采用以下制造工艺：

① 90°弯管采用 316L 材质，即使没有氟塑料喷涂层的保护，也可耐受绝大多数腐蚀性介质的腐蚀。由于流路合理，没有死角，而且可以认为 90°弯管的温度与流体温度基本一致，所以不会结晶。

② 弯管内壁、连接法兰的密封面，以及差压信号取压孔，均喷涂以新型氟塑料。由于氟塑料表面光滑，所以不会有自聚物沉积。

③ 采用 PTFE 导管传送差压信号。

④ 智能差压变送器内与腐蚀性介质接触的部件，均采用耐腐蚀材料制成。

⑤ 为防止易结晶介质在差压信号管内结晶、自聚，差压变送器高低压室及差压信号管内，均采用氮气连续吹扫，氮气流量 3ml/min。一瓶气可以用一年。而且短时间停止吹气，也不致于导压管堵塞。

⑥ 为防止弯管传感器管内壁结晶，采用管外伴热保温。

⑦ 为了在弯管传感器内壁万一结晶、自聚时，便于拆开清洗，传感器采用法兰连接。

⑧ 压力变送器经特殊设计的连接头，安装在差压变送器正压室的排液口上。

⑨ 为了彻底解决腐蚀性介质对温度传感器保护套管的腐蚀问题，采用铠装铂热电阻管外安装方法^[7]，并在安装完毕用发泡剂喷射法形成保温层。温度传感器外形如图 3 所示。

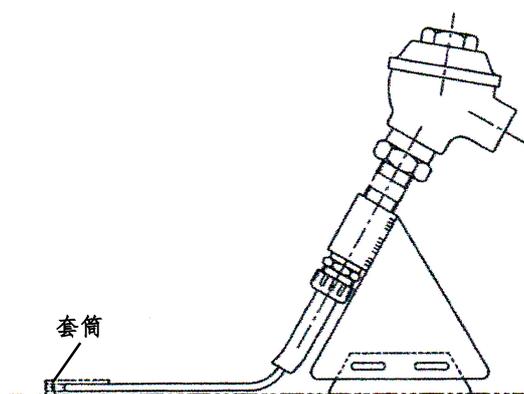


图 3 夹装式铠装铂热电阻的安装

3.2 取压口的设计与耐腐蚀问题的解决

目前，在温度不很高的条件下，管道防腐蚀普遍采用衬 PTFE 的方法，既有效又安全可靠，成本也在可接受的范围内。其中直管段、弯头和法兰管口等是量大面广的品种，与这些品种相比，流量传感器要复杂得多。因此在设计和施工中要认真对待，对每一个细节都要有应对措施，弯管流量传感器的两个取压口就是如此。

在国家标准 GB/T 2624 中，对差压式流量传感器的差压信号取压孔作了下述规定：形状呈圆形，不得有毛边和卷口。取压孔直径应小于管道内径的 0.13 倍。太大的孔径，在流体流过取压孔时容易产生涡流而引起差压测量误差，而孔径太小，对于耐腐蚀弯管流量传感器来说，又使喷塑施工发生困难，因此设计时应执行标准的同时兼顾可行性。

标准中规定的取压孔不得有毛边和卷口的要求，不会有问题，因为即使金属孔有毛边和卷口，喷塑之后也全被掩盖了。而对于喷塑管上的取压孔来说，需要关注的是另一个问题，即喷塑层的厚度及均匀性，如果金属孔存在 90° 锐缘，则在锐缘处形成的 PTFE 保护层就会很薄，而且附着得不够牢固，使用日久容易破损。为了解决这个问题，金属管圆筒形开孔与管道内外壁相交处，加工成 90° 圆弧，圆弧的曲率半径应尽可能大。取压孔的喷塑层要求厚度均匀，而且延伸到管道外壁足够的距离。

与取压孔有关的再一个问题是取压孔与 PTFE 管的连接问题。为此设计了一个特殊的连接头，用 PTFE 棒材加工而成，再用金属压板压在取压孔上。PTFE 导压管经管口翻边后与取压孔相连。这样连接方式，在常温条件下，可在 0.6MPa 条件下长期工作。

4 弯管流量计工作原理

4.1 弯管流量传感器工作原理

弯管流量计是利用流体流过一个 90° 弯管时，在弯管内外侧产生的压力差 Δp 来测量流量的差压式流量计。仪表由一个 90° 弯管和差压变送器等组成，如图 4 所示。

按照强制旋流理论，可以求得通过 90° 弯管的流体流量公式^{[8][9]}：

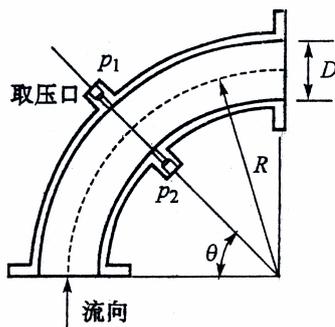


图 4 弯管流量传感器

$$q_v = C \sqrt{\frac{R}{2D} \left(\frac{\pi D^2}{4} \right)} \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (1)$$

及

$$q_m = C \sqrt{\frac{R}{2D} \left(\frac{\pi D^2}{4} \right)} \sqrt{2\Delta P \rho} \quad (2)$$

式中： q_v —— 体积流量， m^3/s ；

C —— 系数，近似值为 1；

R —— 90° 弯曲率半径， m ；

- D —— 管道内径, m;
- ΔP —— 差压, Pa;
- ρ —— 工况条件下流体密度, kg/m^3 ;
- q_m —— 质量流量, kg/s。

当流体沿着弯管的弧形通道流动时, 流体由于受到角加速度的作用而产生离心力, 使弯管的外侧管壁压力增加, 从而使弯管的内外侧管壁之间形成压力差。该压力差的平方根与流量成正比。

由于 R、D 的实际值与名义值之间都有一定偏差。取压孔位置与理想位置之间也会有微小的偏差, 所以, 如果不经实流标定, 只能得到约 4% 的不确定度^[8]。为此, 仪表出厂之前, 作实流标定, 得到流量系数 α 的值。

$$\alpha = C \sqrt{\frac{R}{2D}} \quad (3)$$

制造厂并给出标定时使用的 R 值和 D 值。于是, 根据测量到的 ΔP 值和 ρ 值连同 α 值, 就可计算得到 q_v 或 q_m 。

4.2 温度压力影响的补偿

从式 (1) 和式 (2) 可知, 流量示值都与工况条件下的流体密度 ρ 成对应的函数关系。而当被测流体为气体时, ρ 又与工况条件下的流体温度压力成对应的函数关系。这种关系在压力较低时, 一般可用理想气体方程描述, 如式 (4) 所示。

$$\rho_f = \frac{P_f T_n}{P_n T_f} \rho_n \quad (4)$$

式中: ρ_f —— 使用状态气体密度, kg/m^3 ;

P_f —— 使用状态流体绝对压力, MPa;

P_n —— 标准状态流体绝对压力, MPa ($P_n=0.101325\text{MPa}$);

T_n —— 标准状态热力学温度, K ($T_n=293.15\text{K}$);

T_f —— 使用状态热力学温度, K;

ρ_n —— 标准状态气体密度, kg/m^3 。

完成此项运算就实现了温度压力补偿。其实质是补偿了被测气体温度压力变化引起气体密度变化对流量测量结果的影响。

在式 (4) 中, 自变量为工况条件下的被测气体温度压力, 所以需对它们进行测量, 温度一般用铂热电阻温度传感器测量, 压力由压力变送器测得, 由于此传感器、变送器一般与被测流体接触, 所以必须解决它们的耐腐蚀和防堵的问题。

4.3 雷诺数补偿问题

在式 (3) 中, 流量系数 α 不仅与弯管流量传感器的几何尺寸有关, 还与流出系数 C 有关。而 C 并不是一个真正的常数, 其数值要受到测量管内流体雷诺数的影响, 所有的差压流量计都存在这种影响, 即 $C=f(\text{Re}_D)$, 而且影响的程度各不相同。而在流量计流量测量范围内, Re_D 又是在变化的。所以必须对全量程范围内的 Re_D 变化进行在线补偿, 才能保证流量测量准确度。在国际标准 ISO 5167: 2003 (E) 和国家标准 GB/T 2624-2006 中, 给出了标准差压流量计 $C=f(\text{Re}_D)$ 表达式。但是弯管流量计属于非标差压流量计, 没有现成的补偿模型, 所以必须另想办法。

解决这一问题的实用方法有两个, 一是通过大量实验获得数据自行建模; 另一方法是整机校验后, 对各试验点的示值误差用折线法逐点校正, 从而保证整套流量计精准可靠。

在这两个方法中, 第一个方法要投入大量的人力和财力, 而且解决的是局部问题, 这个问题

解决之后，由于其他因素的影响，整套流量计的误差还有可能不是很小，而第二个方法由于非标流量计总是要有实流标定这道工序，那么在校验得到各试验点误差后，顺使用折线法进行在线校正，既不增加成本又直观明了，整套流量计准确度又更有保证。本项目中采用的是第二种方法，用 10 段折线法实现雷诺数影响校正。由于是对整套流量计校验得到的误差进行的校正，其实是对引起误差的各种因素的影响进行校正，所以是个又好又省的方法。图 5 和图 6 所示为典型样机全量程范围内的校验点误差和对应的校正曲线。

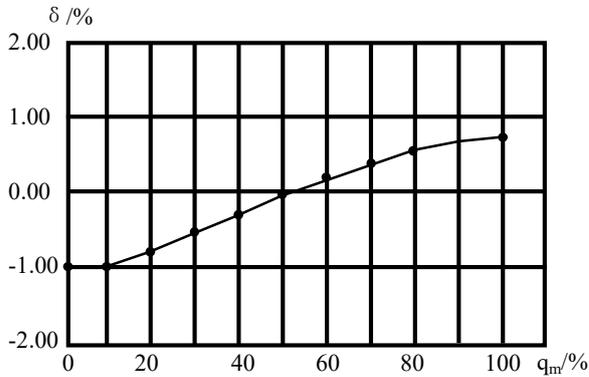


图 5 典型误差曲线

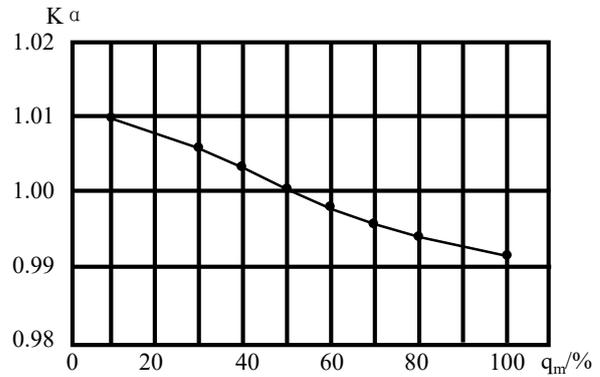


图 6 典型校正曲线

实验表明，当 $Re_D \geq 7000$ 时， α 具有较高的线性度。如果具体的测量对象由于管内气体流速太低导致 Re_D 太小，则可适当缩小管径，使 Re_D 增大。

表 1 所示为典型弯管流量计在空气流量标准装置上的校验记录。

当仪表在配套校验后配套使用的条件下，能得到 $\pm 1.5\%$ 的准确度^{[10][11]}，甚至更高。

表 1 DN80 弯管流量计校验记录

弯管流量计校准原始记录

委托方: 营口营新化工科技有限公司	生产商: 上海同欣自动化仪表有限公司	流量计量程: 0-400kg/h
流量计名称: 弯管流量计	流量计编号: 190720-1	流量计位号: 021FE-319.41
型号规格: FDE080	精度等级: 1.5%	装置内径mm: 77

检定点 (kg/h)	序号	标准表数据				被校表数据						计算误差			试验点 流量系数
		检定时间 (S)	温度 (°C)	压力 (kPa)	质量流量 (kg/h)	质量流量 (kg/h)	差压 (Pa)	密度 (kg/m ³)	流量系数	流速 (m/s)	雷诺数	误差 E1 (%)	平均误差 E (%)	重复性 d (%)	
40.6324	1	11	27.5346	0.3000	40.7679	40.6622	2.8091	1.1648	0.9506	2.0129	10319	-0.2593	0.0609	0.1825	0.9480
	2	10	27.4713	0.3000	40.5330	40.6535	2.8079	1.1648	0.9454	2.0125	10317	0.2973			
	3	11	27.5018	0.3000	40.5962	40.6550	2.8081	1.1648	0.9468	2.0126	10317	0.1448			
123.8849	1	11	27.5018	0.3000	123.8367	125.4031	26.7289	1.1648	0.9361	6.2079	31823	1.2649	1.3093	0.9262	0.9358
	2	11	27.5018	0.3000	123.9060	125.5385	26.7867	1.1648	0.9357	6.2146	31858	1.3175			
	3	11	27.5018	0.3000	123.9121	125.5793	26.8041	1.1648	0.9354	6.2167	31868	1.3455			
206.8361	1	11	27.5346	0.3000	206.7959	208.2972	73.8521	1.1648	0.9405	10.3115	52859	0.7260	0.7572	0.5366	0.9401
	2	11	27.5674	0.3000	206.9071	208.4406	73.9539	1.1648	0.9403	10.3186	52896	0.7412			
	3	11	27.5674	0.3000	206.8053	208.4686	73.9737	1.1648	0.9397	10.3200	52903	0.8043			
285.9638	1	11	27.7314	0.3000	286.2557	286.6576	140.0245	1.1648	0.9454	14.1907	72745	0.1404	0.1487	0.1061	0.9454
	2	11	27.7642	0.3000	286.0602	286.5368	139.9062	1.1648	0.9452	14.1847	72714	0.1666			
	3	11	27.7970	0.3000	285.5754	285.9726	139.3544	1.1648	0.9455	14.1568	72571	0.1391			
362.8817	1	11	27.9282	0.3000	363.0977	362.5210	224.2616	1.1648	0.9476	17.9462	91997	-0.1588	-0.1625	0.1293	0.9477
	2	10	27.9610	0.3000	362.9999	362.1879	223.8483	1.1648	0.9482	17.9297	91912	-0.2237			
	3	11	27.9610	0.3000	362.5474	362.1669	223.8221	1.1648	0.9471	17.9287	91907	-0.105			

最大误差: 1.3093 %	平均流量系数: 0.9434
检定人: 朱德忠	核定日期: 2019.9.30
审核人: 纪纲	

4.4 密度差异的处理

在气体流量测量任务中，被测气体的种类成千上万，气体的性质也差异很大，其中对测量准确度影响最大的是气体密度。在流量计做实流校验或校准时，社会上能提供服务的流量标准装置除了空气介质之外，最多还有天然气。那么就出现了一个问题：在空气流量标准装置上校准合格的流量计，用来测量氯化氢流量仍然准确吗？要回答这个问题需要借助式（2），从上面的原理分析，用同一套弯管流量计测量不同种类的气体，由于物性的差异，将会使式（2）中的 C 和 ρ 有变

化，其中对 C 的影响是微小的，可予以忽略，而 ρ 的变化对测量结果的影响不能忽略，可用式 (5) 予以换算。

$$q_{m\max} = \sqrt{\frac{\rho}{\rho'}} q_{m\max}' \quad (5)$$

式中： $q_{m\max}$ —— 实际使用介质对应的流量上限，kg/s；

ρ —— 实际使用介质设计工况条件下密度，kg/m³；

ρ' —— 校准介质设计工况条件下密度，kg/m³；

$q_{m\max}'$ —— 校准介质对应的流量上限，kg/s。

例如一台氯化氰流量计 $q_{m\max} = 604\text{kg/h}$ ，工艺专业提供参数，常用工况 $P_1=10\text{kPa G}$ ， $t=45^\circ\text{C}$ ，对应的 $\rho=2.7820\text{kg/m}^3$ ，由于干空气在 $P=10\text{kPa G}$ ， $t=45^\circ\text{C}$ 条件下， $\rho'=1.2198\text{kg/m}^3$ ，所以在空气流量标准装置上校准，流量上限 $q_{m\max}' = 400\text{kg/h}$ 。

图 6 所示为耐腐型弯管流量计外形图。

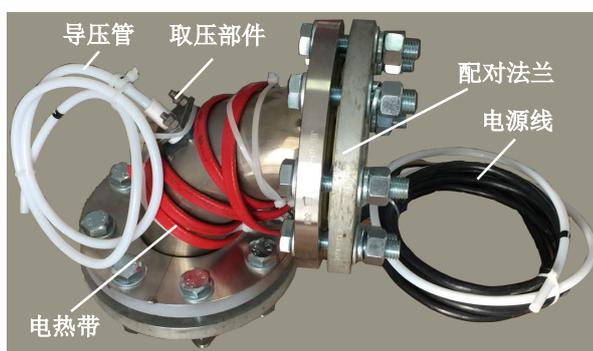


图 6 耐腐型弯管流量计外形

5 仪表的安装

5.1 变送器的安装

仪表在制造厂出厂前，配套的差压变送器、压力变送器和吹气用浮子流量计已组装在不锈钢保护箱内，保护箱安装在距传感器不远的地方。变送器强调安装在保护箱内，目的是消除日晒和雨淋引起的零点漂移。如果露天安装，上午太阳从东面照在表体上，中午从南面照在表体上，下午从西面照在表体上，由于差压测量采用的是微差压变送器，差压膜盒灵敏度高，在不同的时间，阳光照射在膜盒不同部位，使之受热不均匀，极易引起零点漂移。同样的道理，雨淋也会引起零点漂移。

5.2 电伴热的运用

设置电伴热的目的是弥补弯管流量传感器因自然散热引起的热量损失。免除弯管内壁结晶的担忧。如果确定电伴热，就须在弯管处实施绝热保温。如果实践证明弯管内不会结晶，则无需通电伴热。

6 仪表在现场使用情况

耐腐型弯管流量计安装到三聚氰氨生产流程中投入使用后，流量示值稳定，三年多以来未发生过故障。流量显示值与工艺计算结果基本相符。图 7 所示为现场安装图。

后来利用停车机会拆下流量传感器检查，传感器内壁光滑如初，未发现结晶物的沉积。差压信号导压管内和差压变送器高低压室内也未见结晶物。



图7 DN80耐腐蚀弯管流量计在现场的安装

7 结束语

① 在化工生产过程中有一类气体极易冷凝变成液体和结晶，这是气体的温度需要控制在离气液相平衡温度不远处，而且熔点与沸点又靠得很近的缘故。这为其流量测量带来极大的困难。

② 氯化氟气体因为易结晶和自聚，孔板流量计、楔形流量计以及其他测量管内有阻流部件的流量计均无法长周期运行。

③ 应用内壁喷涂有新型氟塑料的弯管流量传感器，配上管外伴热保温，并用氮气连续吹扫差压信号管的方法，能有效地防止介质的结晶、自聚。第一批产品投运三年半以来，一直稳定可靠运行。

④ 这种新型流量计，在雷诺数大于 7000 后，具有很高的线性度，经实流校准能达到 $\pm 1.5\%$ 准确度。

⑤ 耐腐蚀型弯管流量计投入生产流程，经长时期使用实践表明，流量计耐腐蚀性、抗结晶能力以及准确度、稳定性，可靠性，能够适应严酷的工艺条件，满足生产要求。

⑥ 此方法可为与氯化氟气体具有相似特性的介质测量流量提供借鉴。

参考文献：

- [1] 左景伊, 左禹. 腐蚀数据与选材手册. 北京: 化工工业出版社, 1995.
- [2] 纪纲. 流量测量仪表应用技巧 第二版. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- [3] 曹王钊, 杨建鄂. 楔形流量计及其在我厂的应用. 冶金自动化, 1998(5): 52~54.
- [4] 纪纲, 纪波峰. 流量测量系统远程诊断集锦. 北京: 化学工业出版社, 2012.
- [5] 王池, 王自和, 张宝珠, 孙淮清. 流量测量技术全书. 北京: 化学工业出版社, 2012.
- [6] 蔡武昌, 孙淮清, 纪纲. 流量测量方法和仪表的选用. 北京: 化学工业出版社, 2001.
- [7] 林洪俊, 邱学. 石油化工加氢反应器温度检测工程设计. 石油化工自动化, 2021, 57(4): 41~43, 48.
- [8] 孙彦勋, 梁国伟, 盛健. 流量计量与测试. 第二版. 北京: 中国计量出版社, 2007.
- [9] 能源计量器具应用技术指南编委会. 能源计量器具(流量)应用技术指南. 北京: 中国石化出版社, 2011.
- [10] GB/T 2624-2006 用安装在圆形截面管道中的差压装置测量满管流体流量.
- [11] JJG 640-2016 差压式流量计检定规程.

(本文源自《石油化工自动化》2023年第2期)