

## Development of Thermal Mass Flowmeter in Highly Concentrated Hydrogen Peroxide Catalytic Decomposition Engine Test

SHI Yu<sup>\*</sup>, WANG Shexi, CHENG Jingxian, ZHANG Ying, YU Wei

(China Aerodynamic Research & Development Center, Mianyang Sichuan 621000, China)

**Abstract:** The flux of hydrogen peroxide is an important index in engineering design when the new gas generator is studied. Because of the particular characteristics of hydrogen peroxide, the flowmeter must satisfy some requirements, including direct contact capability, low flow-rate measurement, non-throttling component. There are no reports and production about hydrogen peroxide flowmeter before, so it's necessary to develop the calibration technique and application technology of hydrogen peroxide flowmeter. Based on the advantages and disadvantages of various flowmeters, the thermal flowmeter which satisfies the requirements of the measurement will be developed. A new type thermal flowmeter that meets hydrogen peroxide flow measurement will be designed. Calibration technique and application technology will also be studied.

**Key words:** mass flowmeter; thermal mass flowmeter; catalytic decomposition engine; highly concentrated hydrogen peroxide; flowrate measurement

EEACC: 7230L

doi: 10.3969/j.issn.1004-1699.2010.11.002

## 催化分解发动机试验用高浓度过氧化氢热式质量流量计研制

史煜<sup>\*</sup>, 王设希, 程静贤, 张莹, 于炜

(中国空气动力研究与发展中心, 四川 绵阳 621000)

**摘要:** 在研究新型高浓度过氧化氢催化分解发动机和进行催化剂性能测试时, 过氧化氢流量是计算催化剂床载荷, 衡量过氧化氢分解效率的重要指标。在某新型发动机研究中, 由于过氧化氢流量不足 20 g/s, 再考虑到高浓度过氧化氢的特殊物化性质, 因而无法找到合适的流量计进行流量测量。通过分析各类常用流量计性能特点, 最终研制了一种基于热分布型质量流量测量原理的小流量高浓度过氧化氢流量计。它满足小流量测量、与过氧化氢直接接触的材料二级以上相容、流量计内部无阻流部件的要求, 测量精度优于 3% F.S。

**关键词:** 质量流量计; 热式流量计; 催化分解发动机; 高浓度过氧化氢; 流量测量

中图分类号: TH814.6

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2010)11-1528-04

在研究新型过氧化氢催化分解发动机和进行催化剂性能测试时, 过氧化氢流量是计算催化剂床载荷, 衡量过氧化氢分解效率的重要指标, 是后期工程设计时确定发动机结构形式的重要依据; 同时, 实时的过氧化氢流量曲线是催化分解发动机的重要性能曲线, 可直接反映发动机和催化剂的运行状况, 并能够在催化剂或过氧化氢出现问题的时候, 及时发现并做出响应。因此试验中对过氧化氢流量进行准确实时的测量就显得非常重要。

由于试验中需要测量的流量小, 以及高浓度过

氧化氢的特殊物理化学性质, 要求流量计①必须能够进行小流量测量, ②与过氧化氢直接接触的材质要达到二级以上相容; ③流量计内部最好没有阻流部件, 以避免过氧化氢在流动过程中因为碰撞而发生分解。

通过分析各类流量计的性能特点, 发现热分布型热式质量流量计能够满足测量要求。它的测量管被加热到略高于被测流体的温度, 当流体流经测量管的加热部位时, 热量会传导给流体, 根据测量管加热部位被冷却程度就可较精确地测出流体的流

量<sup>[1-5]</sup>。从测量原理上讲,它适合进行小流量测量<sup>[6]</sup>。从结构形式上讲,其内部为一薄壁直管,内部无阻流部件,过氧化氢直接从管中通过。从工艺实现上讲,直管材质与流量计壳体均可选用与过氧化氢二级相容的材质并通过焊接方式连接。

最终基于热分布型质量流量测量原理,研制成功测量小流量高浓度过氧化氢的流量计,测量精度优于 3% F.S。

## 1 流量计设计

### 1.1 技术要求

适用介质:质量分数 90% 以上的高浓度过氧化氢;

测量精度:≤3% F.S;

量程:2 g/s ~ 20 g/s;

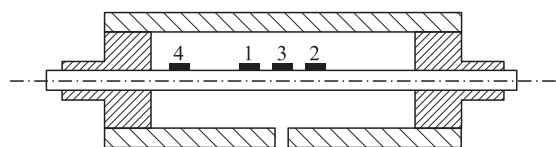
工作压力:0 MPa ~ 10 MPa;

适用管道直径:Φ4 mm ~ Φ15 mm;

工作温度:5 °C ~ 60 °C。

### 1.2 流量计设计原理

为尽可能提高流量计测量精度,设计的热式质量流量计采用如图 1 所示的三个测温铂电阻,一个加热铂电阻的结构<sup>[7]</sup>。



1.上游测温铂电阻 $R_1$ ; 2.下游测温铂电阻 $R_2$ ;  
3.加热铂电阻 $R_3$ ; 4.来流测温铂电阻 $R_4$

图 1 热式质量流量计原理图

在薄壁测量管外壁上布置两个相同的用于测温的金属铂电阻——上游  $R_1$  和下游  $R_2$ , 这三个测温电路均采用桥式结构, 每个电桥由感温铂电阻与三只精密电阻组成; 两个铂电阻正中布置一个用于加热的金属铂电阻  $R_3$ , 所供给的热量  $Q$  通过管壁、流体边界层传导热量给管内流体(边界层内热的传递可以看作是以热传导方式实现的)。  $R_4$  是一个测量来流温度的铂电阻。

流体静止时, 由于  $R_1$ 、 $R_2$  对称安装在  $R_3$  两侧, 因此上下游测温铂电阻处于相同温度场(如图 2<sup>[8-9]</sup>中虚线上  $T_{R_1}$  和  $T_{R_2}$  所示), 此时测温电桥处于平衡状态, 无信号输出。当管道内液体流动时, 上游测温铂电阻  $R_1$  受温度较低的来流影响, 温度降低; 在流体经过加热铂电阻被加热后, 其温度上升, 被下游测温铂电阻  $R_2$  测量, 此时上下游铂电阻处于不同的温度场, 存在温差  $\Delta T$ (图 2 中实线上  $T'_{R_1}$  和  $T'_{R_2}$  高度差)。

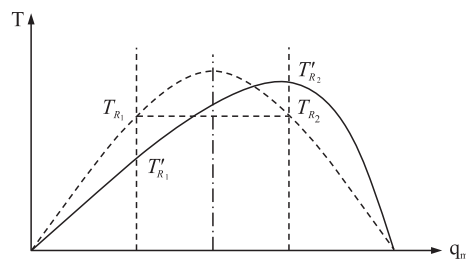


图 2 上下游铂电阻间温差与流量关系

由电桥测出两测温铂电阻阻值的变化, 求得两组线圈平均温度差  $\Delta T$ , 便可按下式(1)导出质量流量  $q_m$ <sup>[10]</sup>。

$$q_m = \frac{Q}{c_p \Delta T} \quad (1)$$

式中:  $Q$  是单位时间加热器提供热量, J/s;  $c_p$  是流体的比热容, J/(g·°C);  $\Delta T$  是上下游测温铂电阻间温差, °C。

来流测温铂电阻  $R_4$  实时测量来流温度, 并通过控制电路与加热铂电阻  $R_3$  始终保持一预设固定温差, 避免试验过程中来流温度变化给测量结果带来影响。

### 1.3 铂电阻加热温度对过氧化氢分解影响

根据热式流量计原理,  $\Delta T$  大可增加测量灵敏度和准确度, 当流量一定时, 可通过在一定范围内增加  $R_3$ 、 $R_4$  之间预设温差来实现。但由于过氧化氢受热后会发生分解, 并且安全性能降低, 因而预设温差不能过高。采用 GJB 6370-2008《高浓度过氧化氢规范》中过氧化氢稳定度测定方法, 测定了环境温度 17 °C 时, 加热温度分别为 30 °C、40 °C、50 °C、60 °C, 加热时间为 1 h 时过氧化氢含量, 结果见表 1, 最终确定预设温差在 25 °C 左右为宜。

表 1 过氧化氢含量(质量分数)对比

原始含量	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C
90.2%	90.2%	90.2%	90.0%	89.9%

### 1.4 流量计内部结构及封装

薄壁测量管与流量计壳体可选用 1Cr18Ni9Ti、0Cr18Ni9Ti、316 等不锈钢材质, 实际使用的是 1Cr18Ni9Ti。

由于电子元器件所用材质复杂, 其中铅锡等材质能催化过氧化氢分解, 为避免过氧化氢因意外流入测量管与壳体之间发生危险, 要求尽量将各类器件安排在流量计外, 壳体内仅留下铂电阻, 通过壳体上预留的引线孔引出。

实际使用的铂电阻采用陶瓷封装, 通过粘贴的方式安装在薄壁管上。粘贴采用的是自制超低粘度

环氧树脂胶粘剂。为考察铂电阻和粘贴胶与过氧化氢的短时相容性,将铂电阻和用粘贴胶制成的胶膜(厚度 25  $\mu\text{m}$ )浸入 90% 过氧化氢 4 h,铂电阻本体和胶膜都没使过氧化氢分解。但铂电阻引出线材质却使过氧化氢发生了较为明显的分解,解决的办法是将贴片胶采用提拉法均匀浸涂在引出线上。

壳体上引线孔采用普通双组环环氧快干胶密封,将完全固化后的胶块浸入 90% 过氧化氢 4 h,未发现过氧化氢分解,胶块性状也未发现明显变化。

### 1.5 电路及软件设计

测量电路的总体框图如图 3 所示,其中 A/D 转换、查表计算、PID 控制计算、传输均由单片机实现。测温电路均采用桥式电路结构,这是因为桥式电路可获得良好的线性度,并可预设初始温度误差,简化标定过程,同时可提高测温可靠性。

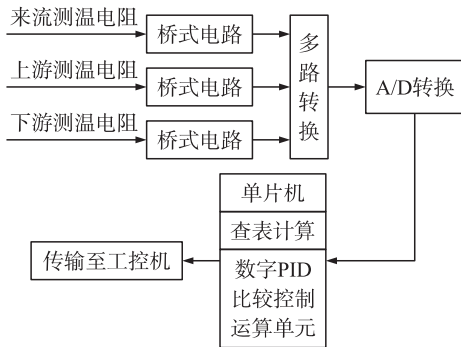


图3 测量电路总体框图

由于试验过程用时较长,来流温度变化会使来流温度改变,影响到测量结果,来流测温铂电阻  $R_4$  就是实时测量来流温度变化,并控制加热铂电阻  $R_3$  上的加热电压值以形成固定温差,其控制方式通过数字 PID 方法的计算来消除来流温度变化的影响。虽然也可通过电路实现 PID 控制,但数字 PID 算法的可靠性更高。

具体测量过程是:单片机通过控制 A/D 转换器同时采集三个测温桥路的信号,得到相应温度值,通过查表计算获取温度值,再进行数字 PID 比较控制运算单元消除环境温度影响,最终由式(1)计算出质量流量  $q_m$ ,并将结果通过 RS485 接口传至工控机。

### 1.6 流量计标定

参考国家标准 GB/T 17612-1998《封闭管道中液体流量的测量 称重法》,以及国家计量检定规程 JJG 897-1995《质量流量计》,设计了静态称重流量测量装置。流量计标定原理如图 4 所示。出于安全考虑,标定时未使用高浓度过氧化氢,而是使用的蒸馏水。文献<sup>[11]</sup>指出,用某一流体介质标定过的热分布式热式质量流量计,可直接用于测量其他流体流量,测量结

果在标定结果上根据式(1)用比热容  $c_p$  进行换算。由于 20  $^{\circ}\text{C}$  下蒸馏水比热容为 4.19 J/(g $\cdot^{\circ}\text{C}$ ),而 90% 过氧化氢比热容为 2.77 J/(g $\cdot^{\circ}\text{C}$ ),因此,在测量过氧化氢流量时,可在蒸馏水标定数据的基础上直接代入系数 0.66 即可。经实际试验中称重验证,该结论是可靠的。

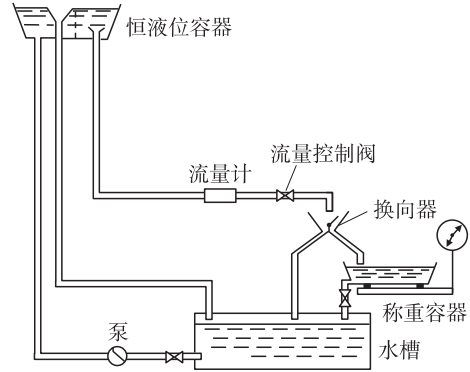


图4 流量计标定原理图

## 2 结果讨论

流量计标定范围 1.5 ~ 15 g/s,用蒸馏水标定的数据见表 2。标定数据的可疑值按格拉布斯(Grubbs)法计算后取舍。

表2 流量计标定数据

真实流量(g/s)	显示流量平均值(g/s)	流量计误差(%)
1.50	1.52	1.3
2.30	2.28	0.9
3.60	3.61	0.3
5.33	5.29	0.8
7.47	7.52	0.5
10.07	10.15	0.8
14.93	15.02	0.6

在挤推压力恒定、试验时长 100 s 条件下对 90% 过氧化氢用量进行称重验证,流量计显示值和实际称重数据对比见表 3。

表3 显示值与实测值对比

流量计显示流量(g/s)	称重计算的平均流量(g/s)
12.6	12.8
12.6	13.0
12.5	12.3
12.5	12.2

典型流量—输出曲线见图 5。

该流量计在环境温度 17  $^{\circ}\text{C}$ ,管道内径 8 mm,挤推压力恒定的条件下,用质量浓度为 90% 的过氧化氢在标准发动机上进行常温启动催化分解试验,典型的室压流量示意曲线见图 6。

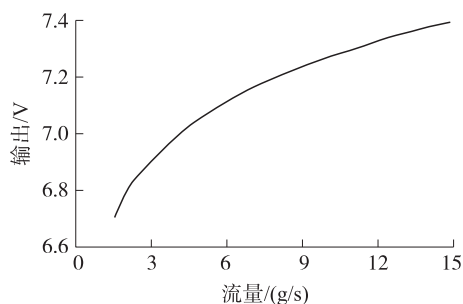


图5 典型标定曲线

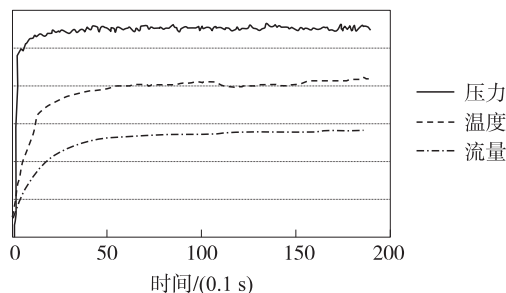


图6 发动机典型压力温度流量示意曲线

可以看出,试验中发动机室压稳定后,标志着试验进入了稳定状态,此时过氧化氢真实流量也处于平衡状态,但实际上显示值却尚未达到实际值,流量计输出还需要经过一段时间才能达到实际值。这是由热式质量流量计的自身特性决定的。由于发动机试验中不要求对脉冲试验程序进行流量测量和监控,仅要求对稳态 20 s 程序、稳态长程试验程序进行流量测量和监控,因此完全可以满足试验的使用要求。

### 3 结论

热式质量流量计非常适合进行小流量测量,在

设计中又由于采用了与过氧化氢相容的材质,实现中不需要使用节流部件,因此很适合在小流量过氧化氢催化分解发动机试验中测量流量。在 2 g/s ~ 20 g/s 的流量测量范围内,测量精度优于 3% F.S。

#### 参考文献:

- [1] Rasmussen A, Zaghoul M E. The Flow with MEMS[J]. IEEE Circuits and Devices Magazine, 1998, 14(4): 12-25.
- [2] 赵伟国,宋执环,黄震威. 一种基于单传感器的热式气体流量测量方法[J]. 传感技术学报,2009,22(3):442-446.
- [3] 梁国伟,李长武,王芳. 多点热式气体质量流量测试方法实验研究[J]. 传感技术学报,2005,18(4):785-789.
- [4] 王利恒,李昌禧. 热式气体流量计温度补偿研究[J]. 传感技术学报,2008,21(8):1379-1382.
- [5] 余柏林,甘志银,刘胜等. 新型空气质量流量传感器的建模与设计[J]. 传感技术学报,2007,20(7):1517-1521.
- [6] 王桂娜,苏小光. 微小气体流量检测技术的研究[J]. 中国测试技术,2006,32(6):52-54.
- [7] Kazuto Otakane, Katsuhito Sakai, Minoru Seto. Development of the Thermal Flow Meter[C]//SICE Annual Conference, Fukui University, 2003: 3080-3083.
- [8] Haiyang Cheng, Ming Qin, Donghui Gao, et al. A Low Noise CMOS Instrumentation Amplifier for Integrated Thermal Gas Flow Sensor[C]//Solid-State and Integrated Circuits Technology 7<sup>th</sup> International Conference, 2004: 1831-1834.
- [9] Gert J A van Dijk, Johan H Huijsing. Bridge-Output-To-Frequency Converter for Smart Thermal Air-Flow Sensors[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1995, 44(4): 881-886.
- [10] Sultan G. Single Straight-Tube. Coriolis Mass Flowmeter[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 1992, 3(4): 241-246.
- [11] 梁国伟,蔡武昌. 流量测量技术及仪表[M]. 北京:机械工业出版社,2002.



史 煜(1975-),男,本科,高级工程师,主要研究方向为各类物理量传感器、化学传感器和电阻应变计研制,同时也从事高浓度过氧化氢试验、应用技术研究,sy403@sina.com。