

燃气燃烧与 输配测试技术

金志刚 编著



中国建筑工业出版社

燃气燃烧与输配测试技术

金 志 刚 编著

中国建筑工业出版社

燃气燃烧与输配测试技术是鉴定、提高各种燃气(天然气、沼气、液化石油气及人工燃气等)设备的效益和节约能源的重要科学方法。本书共十章分别介绍了燃气温度、压力、流量、火焰温度、空间三维流速的测定;燃气发热量、比重和火焰传播速度的测量及气体成分的分析;各种炉窑和各种燃烧与输配设备的测试原理与方法;测试误差理论与实验数据处理方法,以及实验室的基本操作与安全知识等。此外,还介绍了有关红外线分析和激光测速等先进的测试原理与方法。

本书可供从事城镇、工业各种燃气供应与燃烧设备的设计、运行管理等方面的科技人员,实验室工作人员及大专院校有关专业师生参考。

燃气燃烧与输配测试技术

金 志 刚 编著

*

中国建筑工业出版社出版(北京西郊百万庄)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

中国建筑工业出版社印刷厂印刷(北京阜外南礼士路)

*

开本: 850×1168毫米 1/32 印张: 16 $\frac{3}{8}$ 字数: 438 千字

1981年4月第一版 1981年4月第一次印刷

印数: 1—3,400册 定价: 2.00元

统一书号: 15040·3950

前 言

燃气（包括天然气、沼气、液化石油气、油制气、煤制气、高炉气等）是重要的常规能源之一。燃气供应（燃烧与输配）设施是现代化城市重要组成部分。它对改善人民生活与劳动条件、促进生产自动化、提高产品质量与产量、减轻交通运输负担和降低大气污染等，具有十分显著的效果。

测试工作是实现燃气供应现代化的重要技术基础，同时也是节约能源不可缺少的措施。因为没有准确的测试数据，将会使各种设备的运行参数不能控制，达不到燃料消耗的合理指标，必然造成能源的浪费；另外对燃气和设备的质量没有保证，各项技术经济指标不能核实，生产专业化、产品标准化、系列化也难以实现。所以，随着节约能源工作的推进及四个现代化的进展，必将对燃气燃烧及输配的测试技术提出更高的要求。

近年来，我国燃气事业有了较大的发展。据统计，全国有燃气供应的城市已有六十多个，此外，不少大、中型工厂企业本身都设有燃气发生站，农村沼气也得到了推广。但是，目前缺少系统介绍燃气燃烧与输配测试技术的资料。鉴于此，作者总结了多年来在天津大学实验室工作的经验，并参考国内外有关技术资料，编著了这本《燃气燃烧与输配测试技术》。

本书分十章论述。第一、二章是热工测量部分，除了介绍温度、压力与流量等基本参数的测量方法外，还特别介绍了有关高温烟气与火焰温度、空间流速以及各种条件下流量的测试原理和方法。第三章至第六章是燃气基本性质测量部分，包括发热量、比重与火焰传播速度的测量，以及燃气和烟气成分分析。此外，还介绍了有关测试的新技术，例如红外线气体分析及激光测速等。第七、八章是各类燃气设备的测试方法，其中包括各种燃气

灶具、锅炉、工业窑炉及调压设备等。这些设备性能的优劣，将直接影响燃气供应的实际收益及合理利用能源的综合效果。第九章讨论了误差分析理论与实验数据的处理方法，为评价测试工作的精度提供理论基础，为提高测试工作质量指出方向。最后，第十章介绍了实验室的基本操作与安全、管理等方面常识。

本书编写过程中，得到了天津大学供热通风教研室有关同志的大力支持，并吸取了国家城市建设总局天津市政工程设计院及各地煤气（天然气）企、事业单位的宝贵经验。此外，王昕然同志描绘了全书插图，特此一并致谢。

由于本人水平所限，书中错误与不当之处，请读者批评指正。

目 录

前 言

第一章 温度与湿度测量	1
第一节 概述	1
第二节 一般温度测量仪表及其使用方法	8
第三节 高温测量仪表及其使用方法	41
第四节 气体湿度测量仪表及其使用方法	56
第二章 压力、流速与流量测量	69
第一节 概述	69
第二节 压力测量仪表及其使用方法	73
第三节 一般流速测量仪表及其使用方法	83
第四节 空间流速测量仪表及其使用方法	91
第五节 气体流量测量仪表及其使用方法	100
第三章 比重与发热量的测量	134
第一节 概述	134
第二节 比重的测量	136
第三节 发热量的间歇测量	149
第四节 发热量及华白数的连续测量	160
第五节 根据燃气成分计算比重与发热量	170
第四章 燃气成分分析	173
第一节 概述	173
第二节 气相色谱分析燃气成分	180
第三节 化学分析燃气成分	209
第四节 特殊成分分析	226
第五章 烟气分析	235
第一节 概述	235
第二节 烟气成分单项分析	236

第三节	烟气快速分析	264
第四节	烟气成分综合分析	269
第五节	烟气的连续自动分析	278
第六章	火焰传播速度测量	283
第一节	概述	283
第二节	火焰高度法测火焰传播速度	287
第三节	颗粒示踪法测火焰传播速度	293
第四节	激光测火焰传播速度	300
第五节	测量火焰传播速度的其它方法	309
第七章	燃烧设备的测试	313
第一节	概述	313
第二节	炊事灶与烤箱灶的测试	317
第三节	热水器的测试	348
第四节	采暖器的测试	365
第五节	锅炉的测试	377
第六节	工业窑炉的测试	398
第七节	引射型大气式燃烧器的测试	402
第八章	输配设备的测试	418
第一节	概述	418
第二节	调压器的测试	424
第三节	管道与钢瓶的测试	436
第九章	误差分析与数据处理	443
第一节	概述	443
第二节	误差的传递	453
第三节	测试数据的处理	467
第十章	实验室工作基本知识	485
第一节	基本操作	485
第二节	实验室管理	497
第三节	安全与急救	501
附录		505
主要参考资料		515

第一章 温度与湿度测量

在燃气燃烧与输配中，温度与湿度的测量是很重要的，例如，当储存的液化石油气（丙烷）的温度高于 48°C 时，其蒸气压力就会大于贮罐设计压力，可能导致贮罐破坏；对于燃气燃烧设备也必须控制其排烟温度，排烟温度过高就会造成燃气的浪费；在测量燃气与空气的体积时，必须同时测量温度与湿度，否则就不能准确地算出燃气与空气的标准干体积。因此，应很好掌握温度与湿度测量技术。

第一节 概 述

一、温度的计量单位

温度是物体的热力状态参数之一，它表示物体的冷热程度，也可以说是表示受热程度。物体受热程度是由分子热运动过程中所呈现的内部动能来决定的。构成物体的分子时刻都处于运动状态，分子运动越快，温度越高，运动越慢，温度越低。

温度的国际单位是热力学温度单位（开尔文），其代号为“K”，符号为T。它是水的三相点热力学温度的 $\frac{1}{273.16}$ ，也就是选取水的三相点为基本点，并定义为 273.16K 。所谓水的三相点热力学温度就是单纯的冰、水和蒸气同时存在于一个封闭容器中的温度^[10]。

根据1968年国际实用温标规定，可以使用摄氏度单位，其代号为“ $^{\circ}\text{C}$ ”，符号为 t 。摄氏度与开尔文的关系为 $T = T_0 + t$ ， $T_0 = 273.15\text{K}$ 。 T_0 是冰点的热力学温度。它比水三相点的热力

学温度低0.01K。这里摄氏度是以热力学为基础的。

但是在实际工程上，有时并不十分严格。标定温度计时，仍把标准大气压下冰的熔点定为 0°C ，水的沸点定为 100°C 。当精度要求不高时，取 $T=273+t$ 。工程上经常称 T 为绝对温度。

在英美的资料中，有时还碰到华氏温标，其代号为“ $^{\circ}\text{F}$ ”。华氏温度 $t^{\circ}\text{F}$ 与摄氏温度之间的关系为：

$$t^{\circ}\text{C} = -\frac{5}{9}(t^{\circ}\text{F} - 32)$$

二、温度测量方法

测量温度的方法很多，并且随着科学技术的发展而日新月异。下面介绍燃气燃烧与输配测试技术中比较常用的方法。

（一）膨胀测温法

利用物质的体积或长度随温度变化的性质来测量温度，称为膨胀测温法。用此法制成的测量仪表称为膨胀温度计。根据测量温度的范围不同，采用不同的测温物质。测温物质有液体与固体两种：

1. 玻璃液体温度计 将液体封入玻璃管中，利用液体与玻璃管因受热时具有不同的体积膨胀系数而制成的温度计称为玻璃液体温度计。

2. 双金属温度计 将两块具有不同线膨胀系数的金属片合在一起，利用其受热后膨胀长度不同而制成的温度计称为双金属温度计。

膨胀温度计是最常用的温度计。尤其是玻璃温度计应用范围更是广泛，但是它们不能测高温与表面温度。双金属温度计常用来测量室内空气温度，并且带有自动记录设备。

（二）压力测温法

将物质装入密闭的系统中，利用受热后压力变化的特点测量温度的方法称为压力测温法。用此法制成的温度计称为压力温度计。封入密闭系统中的物质有气态与液态两种：

1. 液体压力温度计 当装入密闭系统的物质是水银、二甲苯

或甲醇时，称为液体压力温度计。

2. 气体压力温度计 当装入密闭系统的物质是氮气等化学性质稳定而且又接近理想气体性质的气体时，称为气体压力温度计。

有时装入低沸点液体，如氯甲烷或氯乙烷等易蒸发的物质，称为蒸气压力温度计。压力温度计常用来测量由 $-50\sim 550^{\circ}\text{C}$ 的非腐蚀性气体或液体温度。多采用于固定的工业设备中，一般在实验室中很少使用。

（三）电阻测温法

利用导体或半导体的电阻随温度变化的性质测量温度的方法称为电阻测温法，用此法制成的温度计称为电阻温度计。当采用半导体时，多称其为半导体温度计。

电阻温度计的精确度较高，很容易实现远距离传送读数与自动记录。半导体点温度计可以测很小空间气体温度及表面温度，有利于测量温度场，是实验室中常备的温度计。

（四）热电偶测温法

利用两种金属丝接在一起，在受热不同时产生热电势的特性测量温度的方法称为热电偶测温方法，用此法制成的温度计称为热电偶温度计。

热电偶的测量范围广，精确度较高，容易实现远距离传送读数与自动记录，并且热电偶尺寸小，构造简单，易于自制。在决定测试系统后，可以根据现场条件，采用不同的金属线材料与长度自制热电偶温度计。

（五）辐射测温法

利用物理辐射能量随温度变化的特性测量温度的方法称为辐射测温法，用此法制成的温度计称为辐射温度计。根据具体的测量原理还可分为以下两种：

1. 光学温度计（光学高温计） 利用辐射体在指定波长光线的辐射强度（单色亮度）与光度灯的灯丝亮度相比较的方法制成的温度计称为光学温度计，或光学高温计。

2.全辐射温度计 利用温度敏感元件的受热程度也可测量辐射热源的温度,敏感元件可以用小型的热电堆或者是不大的双金属螺旋圈制成,这种温度计称为全辐射温度计。

辐射温度计的特点是不与被测介质相接触,因此也不会被高温介质烧坏,其测量范围为 $800\sim 3000^{\circ}\text{C}$ 。但是这种温度计不适合测量高温气体的温度,精确度也比较差。

(六)谱线转换测温法

谱线转换法最常用的元素是钠,称为钠线转换法。将钠置于火焰中,能发射出波长为 0.5896 及 0.5890 微米的两条黄色线。如果在火焰之后置一明亮的背景光源,并使其射出的光线通过钠蒸气火焰。当光源温度不等于火焰温度时,钠线将以明线或暗线出现在光谱中,当光源温度等于火焰温度时,钠线亮度与背景相同而消失。这样改变背景的亮度直到钠线消失,然后用光学高温计测量背景温度,就可以测出火焰温度。这种方法称为钠线转换测温法,它常用于火焰温度的测量。由于这种方法不会破坏火焰结构,所以更适于测量小型火焰的温度。要指出的是,此法测得的温度,实际上是所用元素(钠)的有效电子激发温度,因此在整理数据时,要给予足够的重视。

这种测量方法,需要较精密的光学仪器,一般用于火焰的理论研究,具体的测量方法可以参考有关专著^[14]。

(七)其它测温法

除上述方法外,还有一些特殊的测温方法。例如,利用气体节流后压力降与温度制成的气力式高温计,可以测量高温气体的温度。另外最近利用激光技术,根据激光干涉条纹与温度的关系,可以直接测出温度场等等。

三、气体湿度的计量单位

水的气相是水蒸气,是一种无色无味的透明气体。一般情况下,在空气、燃气及烟气中都含有一定量的水蒸气。表示水蒸气在气体中含量多少的参数,称为气体湿度。计量气体湿度的单位有三种:绝对湿度、相对湿度及水分体积百分数。

(一) 绝对湿度

绝对湿度亦称含湿量。为了计算方便，以单位干气体中含有水蒸气的重量来计量，为此有两种计量方法：

1. 重量绝对湿度 在暖通专业中，以含有 1 公斤干空气的湿空气中所含有水蒸气的重量来表示绝对湿度，故亦称为重量绝对湿度，其计算式如下：

$$d_1 = 622 \frac{H_s}{B - H_s} \quad (1-1)$$

式中 d_1 ——空气重量绝对湿度（克/公斤·干气）；

H_s ——湿空气中水蒸气的分压力（毫米水银柱）；

B ——大气压力（毫米水银柱）。

2. 体积绝对湿度 在燃气专业中，习惯以含有 1 标米³ 干燃气的湿燃气中所含有水蒸气的重量来表示绝对湿度，故亦称其为体积绝对湿度，其计算公式如下：

$$d_2 = 833 \frac{H_s}{P - H_s} \quad (1-2)$$

式中 d_2 ——燃气体积绝对湿度（克/标米³·干气）；

H_s ——湿燃气中水蒸气的分压力（毫米水银柱）；

P ——燃气压力（绝对压力）（毫米水银柱）。

以上计算式适用于低压气体。

(1-2) 式也可以用来计算烟气的绝对湿度。

(二) 相对湿度

1. 空气相对湿度 在一定的温度下，空气中所包含的水蒸气不能超过某一最大值，否则，超过的部分将凝结成水，从空气中分离出来。空气中水蒸气含量到达此最大值时，称为饱和空气，相应的水蒸气分压力及含湿量称为该温度下的饱和水蒸气分压力及饱和含湿量（以 H_{s0} 及 d_0 表示）。 H_{s0} 受温度影响：温度越高， H_{s0} 值越大，空气中能包含的水蒸气越多。表 1-1 中给出不同温度下的 H_{s0} 及 d_0 值。

空气的相对湿度就是空气中绝对湿度与同温度下饱和空气的

压力为760毫米水银柱时，气体的饱和水蒸气分压力与含湿量

表 1-1

温 度 (°C)	饱和水蒸气 分压力 $H_{s,b}$ (毫米水银柱)	饱和含湿量 d_b (克/标米 ³ 干气)	温 度 (°C)	饱和水蒸气分 压 力 $H_{s,b}$ (毫米水银柱)	饱和含湿量 d_b (克/标米 ³ 干气)
-10	2.093	2.22	15	12.699	13.70
-9	2.267	2.45	16	13.536	14.60
-8	2.455	2.58	17	14.421	15.80
-7	2.658	2.84	18	15.357	16.70
-6	2.876	3.10	19	16.364	17.80
-5	3.113	3.36	20	17.391	18.90
-4	3.368	3.62	21	18.495	20.10
-3	3.644	3.87	22	19.659	21.40
-2	3.941	4.13	23	20.888	22.80
-1	4.263	4.51	24	22.184	24.30
0	4.600	4.92	25	23.550	25.70
1	4.940	5.30	26	24.988	27.40
2	5.302	5.56	27	26.505	29.10
3	5.687	6.06	28	28.101	31.00
4	6.097	6.45	29	29.782	33.00
5	6.534	6.99	30	31.548	35.00
6	6.998	7.52	35	41.827	47.00
7	7.492	7.96	40	54.905	62.60
8	8.017	8.63	45	71.391	83.80
9	8.574	9.21	50	91.982	111.20
10	9.165	9.85	55	117.478	148.00
11	9.762	10.04	60	148.791	197.00
12	10.457	11.20	80	354.643	703.00
13	11.162	12.00	100	760.000	∞
14	11.908	12.90			

绝对湿度的比值，也可以认为是空气中水蒸气分压力与同温度下饱和水蒸气分压力的比值。相对湿度通常以百分数表示，其计算式如下：

$$\varphi = \frac{d_s}{d_{s,b}} \times 100 = \frac{H_s}{H_{s,b}} \times 100 \quad (1-3)$$

式中 φ ——空气的相对湿度(%)；

d_s 与 d_{s0} ——分别表示空气中绝对湿度与同温度下的饱和空气的绝对湿度(克/公斤·干气)；

H_s 与 H_{s0} ——分别表示空气中水蒸气分压力与同温度下的饱和水蒸气分压力(毫米水银柱)。

2. 燃气及烟气的相对湿度 与空气一样，燃气与烟气的相对湿度也可以用公式(1-3)计算。对于低压燃气和烟气，其饱和水蒸气分压力与含湿量也可以从表1-1中查得。

(三) 水分体积百分数

燃气与烟气有时以水分的体积百分数来表示其湿度，其计算式如下：

$$r = \frac{V_s}{V} \times 100 \quad (1-4)$$

式中 V_s ——燃气或烟气中水蒸气体积(米³)；

V ——燃气或烟气的总体积(米³)；

r ——水分体积百分数(%)。

水分体积百分数与体积绝对湿度的关系式为：

$$r = \frac{d_2}{833 + d_2} \times 100 \quad (1-5)$$

式中 d_2 ——燃气或烟气的体积绝对湿度(克/标米³·干气)；

r ——燃气或烟气的水分体积百分数(%)。

四、气体湿度测量方法

测量气体湿度的常用方法有以下几种：

(一) 干、湿球温度法

用两支相同的温度计：一支温度计直接测气体温度，称为干球温度；另一支温度计的温包处包有被水润湿的纱布，可测水蒸发时的温度，称为湿球温度。气体湿度越大，干、湿球温度相差越小，利用这种关系测量气体湿度的方法称为干、湿球温度法。

常用的仪表有简单干湿表与通风干湿表。

(二) 毛发测湿法

脱脂的人发，在周围空气湿度变化时，本身长度会发生变化，利用这种性质测量空气的湿度的方法称为毛发测湿法，用此法制成的仪表称为毛发湿度计。这种方法主要用来测量空气湿度，有的毛发湿度计还带有自动记录装置。这种毛发湿度计构造简单，但是准确度较低。

（三）重量测湿法

利用化学吸收剂或其它干燥剂，吸收湿气体中的水蒸气直到其完全干燥，然后测出水分的重量即可直接求得气体的绝对湿度。

这种方法可用来测量空气、燃气与烟气的湿度，但主要用来测量燃气与烟气的湿度。对于高温烟气还要附加冷却装置来帮助分离水分。重量测湿法的原理简单，但要求把气体中的水分全部吸收，并且精密测量水分的重量。

（四）露点温度法

将湿气体在定压下冷却，当达到露点温度时，则会有凝结水出现。气体的湿度越大，则其露点温度越高，利用测露点的方法测量气体湿度称为露点测湿法。

这种方法也可以用来测燃气、空气及烟气的湿度，但主要用来测燃气湿度。近来采用自动控制装置，用此法可较精密地测出燃气的湿度。

（五）电气测湿法

很多物质吸收湿气体中水蒸气后，随着含湿量的增加，导电能力也相应提高。利用这种关系，只要测出置于气体中某物质（常用氯化锂）的导电能力，即可求出气体的湿度。这种方法常用于测量空气的湿度。为了防止氯化锂产生电解现象，应使用交流电。

第二节 一般温度测量仪表及其使用方法

高温与低温的测量仪表与方法有很大不同，此节介绍的是指

低于600°C的温度测量仪表。

一、玻璃液体温度计

玻璃液体温度计的构造简单，使用非常方便，是测量气体与液体一般温度的最普遍的温度仪表。

（一）基本原理

玻璃液体温度计是由一个盛有液体的温包和与温包相连的毛细管组成（图1-1），毛细管旁带有温度刻度。当温度变化时，液体体积变化很大，而玻璃制成的温包的内部容积变化不大，这样毛细管内液柱就会随温度变化而升降。故可根据液面的位置确定相应的温度。

玻璃液体温度计中，采用的液体多数为水银与酒精，有时也用其它有机液体，不同的液体的使用温度测量范围不同，如：

水银	- 30~500°C；
甲苯	- 90~100°C；
酒精	- 100~75°C；
戊烷	- 190~20°C。

有机液体（如甲苯与酒精）体积膨胀系数比较大，所以随温度变化而升降的性能比较灵敏。但是，有机液体容易附着在玻璃上，另外，长期使用后部分有机液体会发生聚合，可能带来比较大的误差。

水银虽然体积膨胀系数较小，但受温度影响不大，另外由于它不粘附玻璃，并能制取非常纯的水银，所以水银温度计的精度较高，应用较广泛。

（二）仪表构造

玻璃液体温度计，根据其本身的形状、构造还可以分成以下几种温度计。

1. 棒式温度计 棒式温度计是由温包1连接一根厚壁玻璃毛细管2制成（图1-1、I）。温度标尺直接刻在毛细管的外壁上。

2. 内标式温度计 内标式温度计是由温包1和一根薄壁玻璃毛细管相连接，在毛细管后面有一片乳白色的温度标尺3。毛细

管与温度标尺板均装在一根圆形的玻璃保护套管 4 内，保护套管一端封闭，另一端熔接在温包上（图 1-1、Ⅱ）。

3. 外标式温度计 外标式温度计是把带有温包的毛细管 2 直接固定在刻有温度标尺的木板 6 上（图 1-1、Ⅲ）。这种温度计的测温液体一般是用染成颜色（红或蓝）的酒精。它基本上只用于测量空气温度，测量上限不超过 $50\sim 60^{\circ}\text{C}$ 。

4. 工业用温度计 安装在工业设备上的温度计，为了防止在操作中碰坏温度计，通常将温度计装入专用的金属保护套管内（图 1-1、Ⅳ）。为改善套管内壁和温包之间的传热，在温包与套管壁间的环形空隙中加入一些易导热的物质。当温度刻度在 200°C 以下时，可以在空隙中注入油；当温度刻度在 600°C 以下时，在空隙中加入铜屑。在套管中注油或加铜屑的高度，只要盖住温包即可，过多会增加仪表的热惰性，从而降低测量的精度。

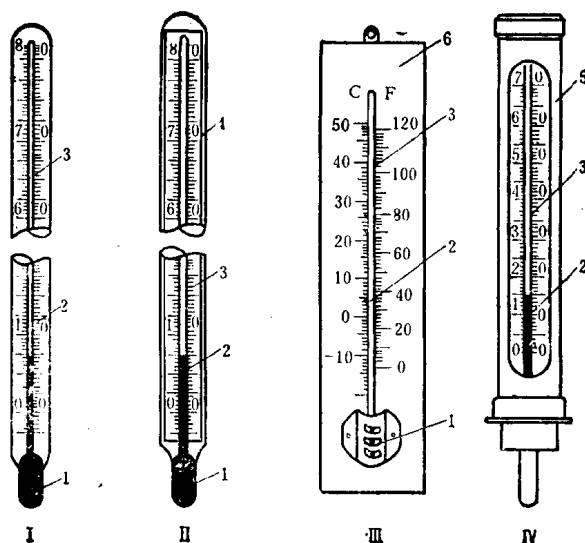


图 1-1 玻璃液体温度计构造

I—棒式温度计；II—内标式温度计；III—外标式温度计；IV—工业用温度计

1—温包；2—毛细管；3—温度标尺；4—套管；5—金属外壳；6—木板