

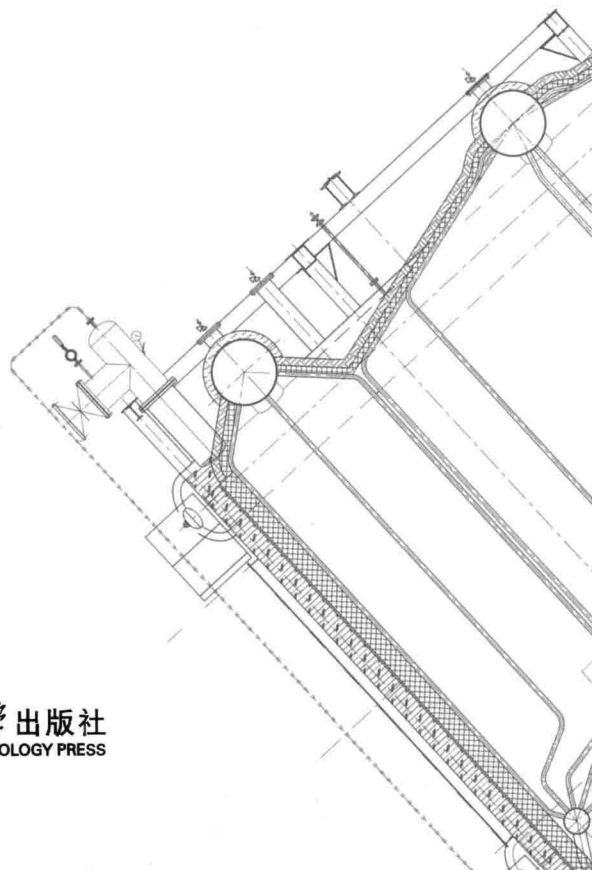
GL 工业锅炉系列丛书



锅炉热工测试技术

THERMAL TEST TECHNOLOGY OF BOILERS

吴江全 钱 娟 曹庆喜 主编

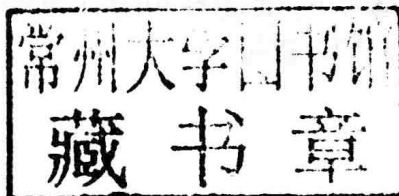


哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

工业锅炉系列丛书

锅炉热工测试技术

吴江全 钱娟 曹庆喜 主编



哈尔滨工业大学出版社

内容提要

本书详细介绍了与锅炉热工测试有关的参数测量仪表及分析仪器,包括压力测量、温度测量、流量测量、物位测量、煤灰分析、气体分析等仪表。本书主要阐述这些仪器的结构、工作原理、安装及使用注意事项等内容,还重点介绍了锅炉热效率测试方法、锅炉能效测试与评价。本书在一定的理论基础之上更注重实用性,对锅炉热工测试实践具有指导作用。

本书可作为高等院校热能、仪表、自动化、电力等相关专业的教材,也可作为相关专业的工程技术人员参考资料,还可供开展煤的洁净燃烧及污染物减排的科学研究时参考。

图书在版编目(CIP)数据

锅炉热工测试技术/吴江全,钱娟,曹庆喜主编. —哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2016.9

(工业锅炉丛书)

ISBN 978-7-5603-5205-3

I. ①锅… II. ①吴… ②钱… ③曹… III. ①锅炉-热工测量-高等学校-教材 ②锅炉-热工试验-高等学校-教材
IV. ①TK226

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 027298 号

策划编辑 王桂芝

责任编辑 刘 瑶

出版发行 哈尔滨工业大学出版社

社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006

传 真 0451-86414749

网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>

印 刷 哈尔滨市工大节能印刷厂

开 本 787mm×1092mm 1/16 印张 16.5 字数 394 千字

版 次 2016 年 9 月第 1 版 2016 年 9 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5603-5205-3

定 价 38.00 元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

《工业锅炉系列丛书》

编 委 会

主 任 赵广播

副主任 吴少华 陆慧林

编 委 (按姓氏笔画排序)

马世君 王文字 刘文铁 刘欢鹏

刘国栋 李瑞扬 朱群益 吕 薇

何玉荣 别如山 吴江全 杜 谦

陈智超 高建民 钱 娟 翁志刚

栾积毅 曹庆喜 曾令艳 翟 明

前 言

锅炉是重要的能源转换设备之一。编者根据热工测试技术的发展及节能环保的需要,编写了《锅炉热工测试技术》一书,本书为“工业锅炉系列丛书”之一。

本书分为8章:

第1~3章主要介绍了压力、温度、流量等物体的基本参数的测量,并对仪器仪表的结构、工作原理、安装与使用注意事项等方面进行了介绍。压力、温度、流量等参数是锅炉热工测试的最基本参数,测量的数据对锅炉热工测试结果具有重要影响。

第4章介绍了物位测量及仪表,重点介绍了常用物位测量及仪表的原理、安装与使用注意事项。物位测量主要应用于锅炉运行水位的监视及安全性保障方面,物位是锅炉运行及热工测量时的重要参数。

第5章介绍了煤灰的特性参数测定。煤灰是锅炉燃烧系统所独有的,煤的特性对锅炉设计及运行影响很大,灰的特性对锅炉运行也有较大影响;煤灰特性测定的准确性直接影响到锅炉效率的计算准确性。

第6章介绍了气体成分测量。气体成分测量主要是对锅炉燃烧产生的烟气成分的测量,烟气成分的数值是锅炉效率的影响因素之一。除了考虑锅炉测试现场的气体成分测量,还要考虑实验室规模的小实验台气体成分的测量。

第7、8章介绍了锅炉热工测试方法、锅炉能效测试与评价。这两章主要围绕锅炉效率的测试及能效评价进行详细阐述,其内容与有关标准保持一致。

本书基于刘文铁编写的《锅炉热工测试技术》。锅炉热工测试技术所涉及的仪器仪表类别多、专业面广、内容多而零散、测量原理相互关联度不高,且仪器仪表更新换代迅速。因此,本书除保留传统实用的测量仪器仪表之外,重点介绍了一些精度较高的新型测量仪器仪表。

本书由哈尔滨工业大学吴江全、钱娟、曹庆喜任主编。具体分工如下:吴江全编写第4章、第7章和第8章;钱娟编写第2章、第3章和第6章的部分内容;曹庆喜编写第1章、第5章和第6章的部分内容。黄怡珉、姜宝成等也参加了本书的编写及校对工作,在此表示感谢。

限于编者水平,书中难免存在不足和疏漏,敬请读者批评指正。

编 者

2016年5月

目 录

第1章 压力测量及仪表	1
1.1 液柱式压力计	2
1.2 弹性式压力计	5
1.3 电气式压力计	10
1.4 活塞式压力计	17
1.5 压力计的选用、校验和安装	19
第2章 温度测量及仪表	22
2.1 温度测量的一般概念	22
2.2 膨胀式温度计	26
2.3 压力计式温度计	29
2.4 热电偶温度计	33
2.5 热电阻温度计	56
2.6 接触式温度计的安装	66
2.7 非接触式测温技术	68
第3章 流量测量及仪表	76
3.1 差压式流量计	77
3.2 动压测量管	86
3.3 转子流量计	91
3.4 涡轮流量计	94
3.5 电磁流量计	98
3.6 超声波流量计	99
3.7 热式流量计	101
3.8 流量测量仪表的校验与标定	106
第4章 物位测量及仪表	108
4.1 玻璃液位计	108
4.2 浮力式液位计	110
4.3 静压式液位计	112
4.4 电气式物位计	113
4.5 超声波物位计	116
第5章 煤灰特性分析	118
5.1 煤的工业分析	118
5.2 煤的工业分析自动仪器法	124

5.3	煤的元素分析	131
5.4	燃料元素的快速分析方法	142
5.5	煤的发热值测定	145
5.6	煤灰熔融性的测定	152
5.7	煤灰颗粒特性筛分试验	155
第6章	气体成分测量	158
6.1	热导式气体分析器	158
6.2	氧气分析器	160
6.3	红外线气体分析器	168
6.4	气相色谱-质谱联用分析仪	173
6.5	热重-红外光谱联用分析仪	183
6.6	工业电导率仪	193
6.7	钠离子浓度计	199
第7章	锅炉热工测试方法	206
7.1	概论	206
7.2	测量项目	210
7.3	测试方法	211
7.4	取样技术	215
7.5	锅炉热平衡及热效率计算	226
7.6	热工测试误差	233
附录 7.1	奥氏分析仪吸收剂配制方法	235
附录 7.2	散热损失	235
附录 7.3	烟气、灰和空气的平均比定压热容	236
第8章	锅炉能效测试与评价	238
8.1	锅炉节能监督管理	238
8.2	锅炉能效测试	239
8.3	锅炉及其系统运行能效评价	244
附表	工业锅炉热效率指标	250
参考文献		253

第 1 章 压力测量及仪表

压力是表征热力过程中工质状态的重要的基本参数之一,也是生产过程中的重要参数之一。要保证锅炉及辅助系统和设备安全、经济运行,需要对压力进行监测和控制;要确切、深入地研究传热过程、室内燃烧、热力机械等热物理过程的状况及内部机理,也需要比较精确地得到其压力及压力分布的数值。

压力是指流体在单位面积上的垂直作用力,即物理学上的压强,工程中一般把压强称为压力。

在国际单位制和我国法定计量单位中,压力的单位是帕斯卡,简称帕,符号为 Pa,1 Pa=1 N/m²,即 1 N 的力垂直均匀作用在 1 m²的面积上,所形成的压力即是 1 Pa。工程应用中也使用工程大气压、毫米汞柱、毫米水柱等单位,不同单位与法定计量单位的换算关系见表 1.1。

表 1.1 压力单位换算表

单位名称	符号	与 Pa 的换算关系
工程大气压	kgf/cm ²	1 kgf/cm ² = 9.81×10 ⁴ Pa
标准大气压	atm	1 atm = 1.013 25×10 ⁵ Pa
巴	bar	1 bar = 1.0×10 ⁵ Pa
磅力/英寸 ²	psi	1 psi = 6.895×10 ³ Pa
毫米汞柱	mmHg	1 mmHg = 1.33×10 ² Pa
毫米水柱	mmH ₂ O	1 mmH ₂ O = 9.81 Pa

运动着的流体压力是指流体的滞止压力,即静压力与动压力之和($p=p_j+p_d$)。动压力 p_d 在流体流动速度低于 60 m/s 时,其计算式为

$$p_d=\frac{W^2\rho}{2}$$

(1.1)

式中 p_d —— 流体动压力,Pa;
 W —— 流体流速,m/s;
 ρ —— 被测介质的密度,kg/m³。

若流体在高速($M=\frac{W}{a}>0.2$,其中 a 为该介质中的声速)运动时,动压力的计算式为

$$p_d=p_j\left(\frac{W^2}{2}\cdot\frac{1}{RT}\cdot\frac{k-1}{k}+1\right)^{\frac{k}{k-1}}$$

(1.2)

式中 p —— 流体动压力,Pa;
 p_j —— 流体静压力,Pa;

k —— 被测介质的绝热指数, 蒸汽为 1.3, 空气和双原子气体为 1.4, 单原子气体为 1.67;

R —— 介质的气体常数;

T —— 被测介质的绝对温度, K。

压力测量的仪表简称压力计或压力计。它按不同的用途和要求, 分为指示型、记录型或带有远传变送、报警调节等装置。

在压力测量中, 常有表压、绝对压力、负压或真空度之分。工业上压力测量的指示值, 均为表压; 所谓绝对压力值即为表压和大气压力之和; 低于大气压力的压力值称为负压或真空度。它们之间的关系如图 1.1 所示。

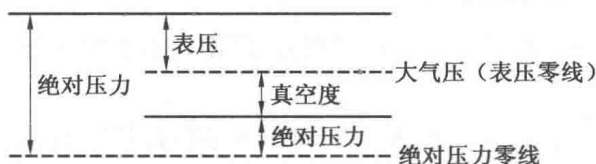


图 1.1 表压、绝对压力及真空度的关系

根据测量原理的不同, 压力测量仪表主要有液柱式压力计、弹性式压力计、电气式压力计、负荷式压力计等。

压力计的精度等级, 是以允许误差占压力计量程的百分率来表示的, 数值越小, 其精度越高。精密型压力计的精度等级分别为 0.1, 0.16, 0.25, 0.4 级; 一般型压力计的精度等级分别为 1.0, 1.6, 2.5, 4.0 级。

1.1 液柱式压力计

液柱式压力计一般用水银、水或酒精等作为工作液, 以流体静力学原理为基础, 把被测压力转化为液柱高度来实现压力测量。由于液体式压力计具有结构简单、制造较容易、使用方便、比较直观、测量可靠、精度较高、价格便宜等特点, 因此在低压、负压或真空度测试中都得到了广泛应用。

1.1.1 U 形液柱式压力计

1. 工作原理

U 形液柱式压力计, 是最简单且能准确地测量压力、负压和压差的仪表。如果 U 形管一端通大气, 另一端接通被测压力, 这时便可通过测量左、右两管中的液体液位差 h 来测得压力值, 如图 1.2 所示。

根据流体静力平衡原理可知, 在 U 形管截面上, 左边被测压力 p 作用在液面上的力与右边一段高度为 h 的液柱和大气压力 p_a 作用在液面上的力平衡, 即

$$(\gamma_1 h + p)A = (\gamma h + p_a)A$$

式中 A —— U 形管内孔截面积, m^2 ;

γ —— U 形管内所加工作液的重度, N/m^3 ;

γ_1 ——U形管内工作液面上流体的重度, N/m^3 ;

p ——被测压力, N/m^2 ;

h ——U形管左、右两液柱的高度差, mm;

p_a ——大气压力, N/m^2 。

由上式可得

$$h = \frac{1}{\gamma - \gamma_1}(p - p_a) = \frac{1}{\gamma - \gamma_1}p_b \quad (1.3)$$

式中 p_b ——表压, N/m^2 。

由式(1.3)可见,U形管两边液柱的高度差 h 与被测压力的表压成正比。比例系数 $\frac{1}{\gamma - \gamma_1}$ 取决于工作液与被测流体的重度差。U形压力计的工作液常用酒精、水、水银、四氯化碳等,取用何种工作液要根据被测压力的大小和被测流体的性质而定。

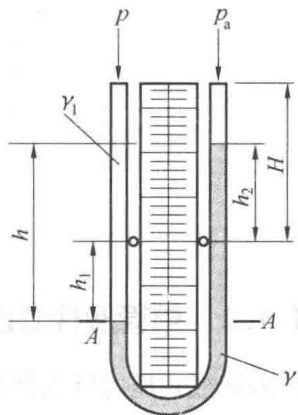


图 1.2 U形管压力计

2. 误差分析

用U形管压力计进行压力测量,其误差主要有:

(1) 温度误差。

因为环境温度的变化,会引起刻度标尺长度和工作液密度发生变化,一般可把前者忽略,而后者应根据需要进行修正。例如,当水从 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 升高到 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,其密度从 999.8 kg/m^3 减小到 998.3 kg/m^3 ,相对变化量为 0.15% 。

(2) 安装误差。

该种压力计在安装时必须使左、右两管和水平面保持垂直,在无压力作用下两管液柱应处于标尺零位,否则会形成误差。如果U形管倾斜 5° ,液面高度差与实际值大约相差 0.38% 。

(3) 重力加速度误差。

由U形管压力计的工作原理可知,重力加速度也会对其测量准确度产生影响。对压力测量精度要求较高时,需要准确测出当地的重力加速度,使用地点改变时,也需要对其进行修正。

(4) 传压介质误差。

在实际应用中,一般来说,传压介质就是被测压力的介质。当传压介质为气体时,如果与U形管两管连接的两个引压管的高度差相差较大,并且气体密度也较大时,必须考虑引压管内传压介质对工作液的压力作用;如果温度变化较大,还需要考虑温度变化对传压介质密度的影响。当传压介质为液体时,不仅要考虑以上各因素,还要保证传压介质和工作液不能发生溶解和化学反应等。

(5) 读数误差。

读数误差主要是由U形管内工作液的毛细作用引起的。当工作液与压力计管壁接触时,液体分子与固体分子间有一相互附着力,当附着力大于液体分子间的内聚力时,液面出现向下凹的现象,此时读数应以凹面的最低点为基准。当附着力小于液体分子的内聚力时,液面出现向上凸的现象,此时读数以凸面的最高点为基准,如图1.3所示。当管内径大于 10 mm 时,U形管单管读数最大绝对误差一般为 1 mm 。

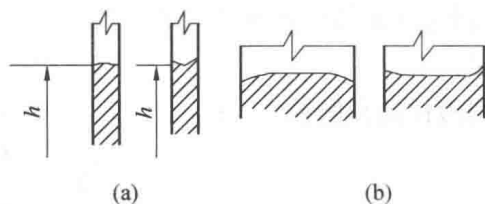


图 1.3 液封表面的形状

1.1.2 单管液柱式压力计

U 形液柱式压力计在使用时需要进行二次读数,容易带来较大的误差,如果将 U 形压力计中的一根管改为大直径的杯,即成为单管液柱式压力计,如图 1.4 所示。

单管液柱式压力计的工作原理和 U 形液柱式压力计相同,只是左边杯子的内径 D 远远大于右边管子的内径 d 。左边杯内工作液体体积的减少量始终与右边管内工作液体体积的增加量相等,所以左边杯内液面的下降远远小于右边管内液面的上升(即 $h_0 < h$)。因为

$$\frac{\pi}{4} D^2 h_0 = \frac{\pi}{4} d^2 h \text{ 或 } h_0 = \frac{d^2}{D^2} h$$

则被测压力的表压值 p_b 和液柱高度差值 H 的关系可写成

$$\begin{aligned} h \left(1 + \frac{d^2}{D^2} \right) &= \frac{p_b}{\gamma - \gamma_1} \\ h &= \frac{p_b}{(\gamma - \gamma_1) \left(1 + \frac{d^2}{D^2} \right)} = K p_b \end{aligned} \quad (1.4)$$

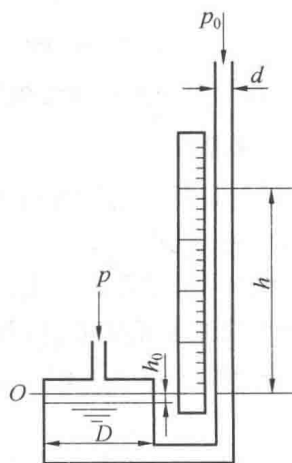


图 1.4 单管液柱式压力计

由于 $D \gg d$, 所以 $K \approx \frac{1}{\gamma - \gamma_1}$, 这样就只需进行一次读数,即可得知被测压力值。

例如,当 $D = 100 \text{ mm}$, $d = 5 \text{ mm}$ 时,则

$$K = \frac{1}{(\gamma - \gamma_1) \left(1 + \frac{d^2}{D^2} \right)} = \frac{1}{1.0025 (\gamma - \gamma_1)} \approx \frac{1}{\gamma - \gamma_1}$$

可见,在测量精度要求不太高时,只需以 $\frac{1}{\gamma - \gamma_1}$ 修正(所引起的误差只有 0.25%)即可。

只在高精度测量时,才需以 $\frac{1}{(\gamma - \gamma_1) \left(1 + \frac{d^2}{D^2} \right)}$ 修正。

1.1.3 斜管微压计

当所测压力(或压差)很小时,测量管中的液位变化量较小,为了减少读数误差,将垂直测量管倾斜一定的角度,使测量管中液位变化增大,从而达到测量微小压力的目的,如图 1.5 所示。

假设斜管的倾斜角度为 α ,在所测压力的作用下,测压管内的液面在垂直方向升高一定

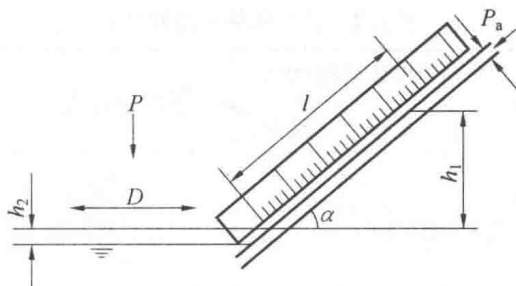


图 1.5 斜管微压计原理

的高度 h_1 , 而容器内的液面下降 h_2 高度, 则两液位的高度差为

$$h = h_1 + h_2 \quad (1.5)$$

式中 $h_1 = L \sin \alpha$ 。

由于 $LF_1 = h_2 F_2$, 所以 $h_2 = L \frac{F_1}{F_2} = L \frac{d^2}{D^2}$ 。经整理得

$$h = L \left(\sin \alpha + \frac{d^2}{D^2} \right) \quad (1.6)$$

或

$$\frac{h}{L} = \sin \alpha + \frac{d^2}{D^2}$$

从式(1.6)可以看出, 当 α 越小时, 测量同样大小的压力, 读数标尺上 L 越大, 因此, 使测压计的灵敏度增加, α 角越小, 仪表的灵敏度越大, 但测量限度越小。然而, α 角也不能太小, 因为 α 角太小时, 管内液面拉得太长, 使读数不易准确, 反而会造成较大误差。

在有些微压计上有 $1/2, 1/5$ 等小孔, 它表示测压管的斜度, 即 $\left(\sin \alpha + \frac{d^2}{D^2} \right) \sqrt{0.81} = 1/2$ 等。

斜管微压计可以与测速元件配合, 测量流体的速度。

1.2 弹性式压力计

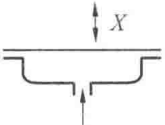
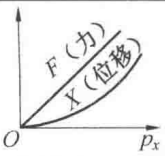
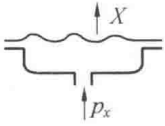
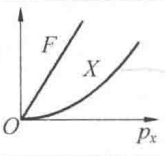
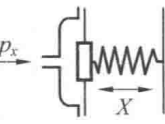
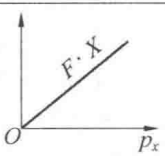
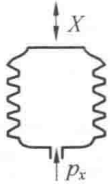
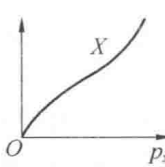
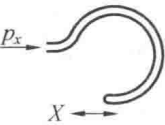
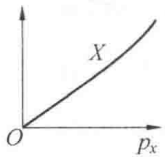
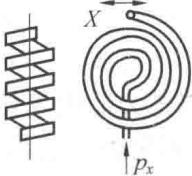
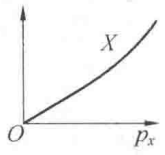
弹性式压力计是用各种弹性元件作为感受件, 以弹性元件受力后的反作用力与被测压力平衡。此时弹性元件的变形就是被测压力的函数, 可以用测量弹性变形(位移)来测得压力。

目前普遍使用的弹性元件有三类, 即薄膜式(包括膜盒式)、波纹管式及弹簧管式。各种弹性元件的结构特性见表 1.2。

由表 1.2 可以看出, 各种弹性元件的测量范围几乎包括所有常用压力, 其输出参数(应力或位移)全部或部分与被测压力成比例关系。因此仪表可得到线性的标尺。所有弹性元件都有良好的动态特性, 其时间常数和自振频率可适应通常热力过程自动调节的要求, 所以弹性元件常被作为自动调节器的感受元件。

对于脉动频率较高的压力来说, 弹性元件是不适用的。弹性元件的品质在很大程度上取决于材料的性质和加工的质量。一般弹性元件要求使用比较特殊的合金材料, 也要求进行严格而复杂的热处理。

表 1.2 弹性元件的结构特性

类别	名称	示意图	测量范围/MPa		输出量特性	动态性质	
			最小	最大		时间常数/s	自振频率/Hz
薄膜式	平薄膜		$0 \sim 10^{-2}$	$0 \sim 10^2$		$10^{-5} \sim 10^{-2}$	$10 \sim 10^4$
	波纹膜		$0 \sim 10^{-6}$	$0 \sim 1$		$10^{-2} \sim 10^{-1}$	$10 \sim 100$
	弹性膜		$0 \sim 10^{-6}$	$0 \sim 0.1$		$10^{-2} \sim 1$	$1 \sim 100$
波纹管式	波纹管		$0 \sim 10^{-6}$	$0 \sim 1.0$		$10^{-2} \sim 10^{-1}$	$10 \sim 100$
弹簧管式	单圈弹簧管		$0 \sim 10^{-4}$	$0 \sim 10^3$			$100 \sim 1\ 000$
	多圈弹簧管		$0 \sim 10^{-5}$	$0 \sim 10^2$			$10 \sim 1\ 000$

1.2.1 膜盒式微压计

膜盒式微压计,在工业上被广泛用来测量空气和烟气的压力或负压。它的结构和工作原理如图 1.6 所示。

膜盒式微压计是采用金属膜盒作为压力-位移转换元件。被测压力 P 对膜的作用力与膜盒弹性变形的反力平衡。膜盒 1 在压力 P 的作用下所产生的弹性变形位移由连杆 2 输出,使铰链块 3 做顺时针偏转,再经拉杆 4 和曲柄 5 拖动转轴 6 及指针 7 做逆时针偏转,在板面 8 的刻度标尺上显示出被测压力的大小。游丝 10 用以消除动间隙的影响。由于膜盒位移与被测压力成正比,因此仪器具有线性刻度。

此外,这一类微压计还附有被测压力低于下限或高于上限给定值的声光报警,它的电子

线路和装置是一个晶体管高频振荡器,通过压力指针7尾部的金属片9出入振荡线圈 L_1L_2 之间,使得振荡器停振或起振,从而控制下限或上限,继电器动作断开或接通声光报警线路,实现下限(或上限)的报警作用。

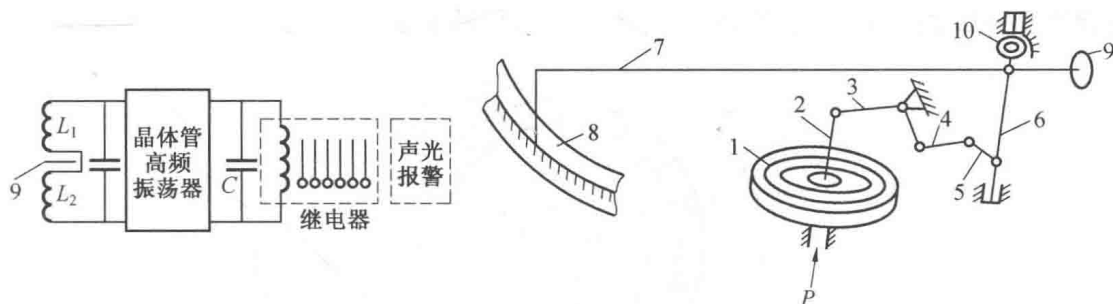


图 1.6 膜盒式微压计的结构及工作原理

1—膜盒;2—连杆;3—铰链块;4—拉杆;5—曲柄;6—转轴;7—指针;8—面板;9—金属片;10—游丝

1.2.2 波纹管式压力计

波纹管式压力计也常被用来测最低压力和负压,采用带有弹簧管的波纹管作为压力-位移的转换元件。它的结构与工作原理如图 1.7 所示。

波纹管 1 本身具有对被测介质的隔离作用和压力的转换作用。压力 p 为作用于波纹管底部的力,与弹簧 2 所产生的弹性反力平衡,弹簧压缩变形位移与被测压力成正比,并由推杆 3 输出,经连杆机构 4 的传动和放大,使记录笔 5 在记录纸 6 上记下被测压力的数值。

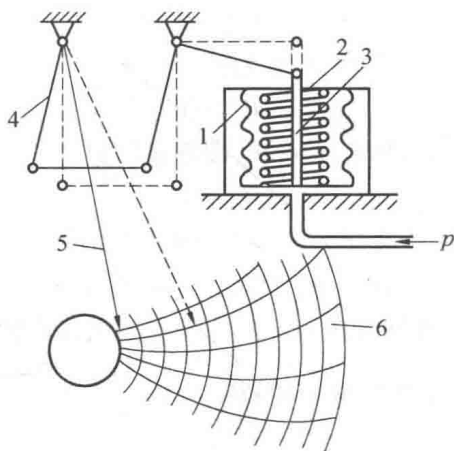


图 1.7 波纹管式压力计的结构与工作原理

1—波纹管;2—弹簧;3—推杆;4—连杆机构;5—记录笔;6—记录纸

1.2.3 弹簧管式压力计

1. 工作原理

如图 1.8 所示,弹簧管是一根扁圆形截面的管子,弯成中心角为 θ 的圆弧形, B 端封闭, A 端接被测压力,如将 A 端固定,则弹簧管在受内压后,其自由端(B 端)就会发生位移,位移最大为 W 。这种现象解释如下:

由于管子的截面为扁圆形,其长轴为 a ,短轴为 b ,短轴与圆弧的平面平行,即 $R-r=b$ 。其中, R 为圆弧的外半径; r 为圆弧的内半径。

扁圆形的弹簧管内部受压后有变圆的趋势,即长轴 a 变小,短轴 b 变大,圆弧 R 变大。当弹簧管外部受压后有变扁的趋势,长轴 a 变大,短轴 b 变小,圆弧 R 变短。

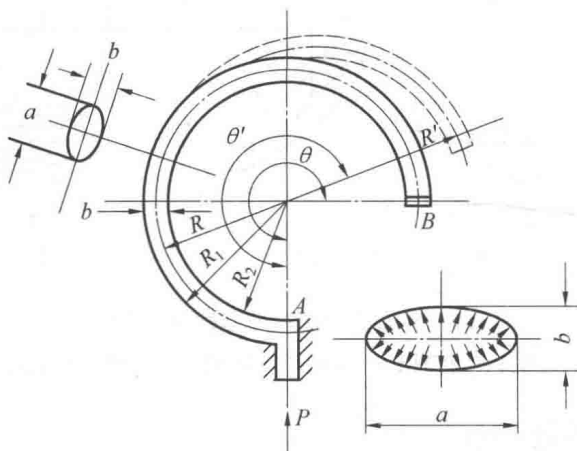


图 1.8 弹簧管的变形和自由端位移

令 R' 为受压变化后的圆弧外半径, r' 为变化后圆弧内半径,则在变化前后的外圆弧长分别为 $R\theta$ 和 $R'\theta'$,变化前后内圆弧长分别为 $r\theta$ 和 $r'\theta'$,其中 θ' 为圆弧中心角。可以近似地认为变化前后的弧长不变,即

$$R\theta \approx R'\theta', r\theta \approx r'\theta'$$

于是

$$(R-r)\theta = (R'-r')\theta'$$

$$R-r = b, R'-r' = b'$$

则

$$b\theta = b'\theta' \quad (1.7)$$

由于弹簧管受压后 $b \neq b'$,所以 $\theta \neq \theta'$,即弹簧的自由端 B 要发生一个角位移 $\Delta\theta$ ($\Delta\theta = \theta' - \theta$)。

由上述可以看出,当内部受正压时 $b' > b$, $\Delta\theta$ 为负值,而当内部受负压作用时, $\Delta\theta$ 为正值。如果管截面为圆形, $b' = b$, $a' = a$,于是 $\theta = \theta'$,即不论管弹簧内是否受压,自由端 B 不可能有位移。这就是为什么弹簧管压力计的弹簧管要做成扁圆形截面的原因。

根据弹性变形原理可知,中心角的相对变化值 $\frac{\Delta\theta}{\theta}$ 与被测压力 p 成正比。其关系可表示为

$$\frac{\Delta\theta}{\theta} = p \frac{1-\mu^2 R^2}{E bh} \left(1 - \frac{b^2}{a^2}\right) \frac{\alpha}{\beta + K} \quad (1.8)$$

式中 μ —— 弹簧管材料的泊松比;

E —— 弹簧管材料的弹性模数;

h —— 弹簧管的壁厚;

K —— 弹簧管的几何参数, $K = \frac{Rh}{a^2}$

α, β —— 与 $\frac{a}{b}$ 比值有关的系数;

R —— 弹簧管的曲率半径。

式(1.8)仅适用于计算薄壁(即 $h/b < 0.7208$)的弹簧管。当其他条件相同时, $\Delta\theta$ 与初始中心角 θ 有关, $\Delta\theta$ 随 θ 的增大而增大。因此, 为了要增大弹簧管受压变形时的位移量, 可采用螺旋形多圈弹簧管结构, 如图 1.9 所示。

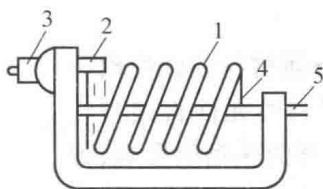


图 1.9 螺旋形多圈弹簧管

1—弹簧管; 2—引入管; 3—接头; 4—杠杆套筒; 5—输出轴

2. 结构

单管弹簧压力计的结构如图 1.10 所示。被测压力由接头 9 通入, 迫使弹簧管 1 的自由端 B 向外扩张, 自由端 B 的弹性变形位移由拉杆 2 传向扇形齿轮 3, 使扇形齿轮做逆时针偏转, 带动中心齿轮 4 和指针做顺时针偏转, 而指针的偏转度数可以通过面板 6 上的刻度读出来, 该读数就是被测压力的数值。由于被测压力值和弹簧管自由端 B 的位移之间具有正比例关系, 因此弹簧管压力计的刻度标尺是线性的。

游丝 7 是用来克服因扇形齿轮和中心齿轮的间隙所产生的误差。改变调整螺钉 8 的位置(即改变机械传动的放大系数)可以实现压力计量程的调整。

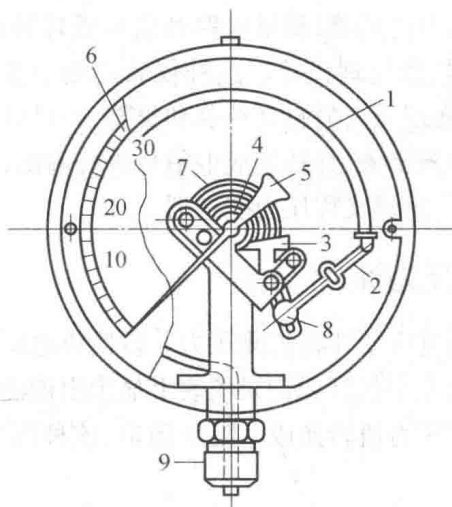


图 1.10 单管弹簧管压力计的结构

1—弹簧管; 2—拉杆; 3—扇形齿轮; 4—中心齿轮; 5—指针; 6—面板; 7—游丝; 8—调整螺钉; 9—接头

3. 引起误差的因素

弹性压力计造成误差的原因主要是弹性元件的质量变化和传动, 如放大机构的摩擦、磨损、变间隙等。

(1) 元件的弹性滞后现象。

弹性滞后现象与磁滞现象相似, 当被测压力恢复到原来值时, 变形都不能恢复原形, 而

出现如图 1.11 所示的现象。这种现象对于弹簧管特别明显,会造成较大的变差。

(2) 元件的弹性衰退。

压力计使用一段时间后,指示值误差会逐渐增大,它主要与弹性元件的热处理有关。

(3) 元件的温度影响。

除了元件材料的应力之外,金属材料的弹性模数也会随温度的升高而降低。如果弹性元件直接与较高温度的介质接触或受到其他设备的热辐射影响,弹性压力计的指示值将随之偏高,造成指示值的误差。因此,弹性压力计一般应在温度低于 50 ℃ 的环境下工作,或采取必需的防温隔离措施。

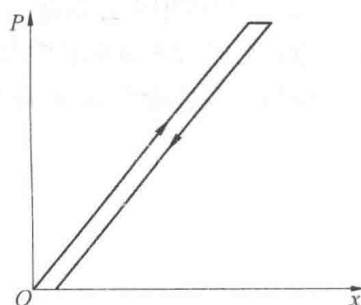


图 1.11 弹性滞后现象

1.3 电气式压力计

一般来说,液柱式压力计和弹性式压力计的安装地点距离被测对象的取压位置不能太远,以免压力信号管道太长而产生信号传递的延迟;而且对于高温高压的被测对象,压力信号管道过长也是不安全的。因此,通常采用各种远传变送装置将感受元件的输出信号就地转变为电信号,然后用导线实现信号的远传。这种能将压力信号转换成电信号进行传输及显示的仪表称为电气式压力计。

电气式压力计通常由压力传感器、测量电路和信号处理装置组成。常用的信号处理装置有指示仪、记录仪、控制器、微处理机等。这种仪表的测量范围较广,可以远距离传送信号,在工业生产过程中可以实现压力的自动控制和报警,并可以与工业控制机联用。压力传感器的作用是把压力信号检测出来,并转换成电信号进行输出,当输出的电信号能够被进一步变换为标准信号时,压力传感器又称压力变送器。

1.3.1 电阻应变式压力计

电阻应变式压力计是通过应变片将被测压力 p 转换成电阻值 R 的变化,再由桥式电路转换成电压(mV)输出信号,在毫伏计或记录仪上显示出被测压力值。

电阻应变式压力计是将压力值转换成电阻来测量,该种压力计由传感器和检测仪两部分组成。

设有一根金属导线,长度为 L ,截面积为 A ,则导线电阻为

$$R = \rho \frac{L}{A}$$

当给导线施加一外力,则导线受力后会发生变形,受力变形后的导线的电阻值也发生变化,如果对上式两边取对数,经微分得

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dL}{L} - \frac{dA}{A} \quad (1.9)$$

式中 $\frac{dL}{L}$ ——轴向应变变量,用 ε 表示;