

REIYING-ENRI
CESHI YU SHU

热平衡测试技术

杜涛恒 编



浙江科学技术出版社

热 平 衡 测 试 技 术

杜 涛 恒 编

2004/08

浙江科学技术出版社

责任编辑：任路平

封面设计：赵益矛

热平衡测试技术

杜涛恒 编

*

浙江科学技术出版社出版

浙江新华印刷厂印刷

浙江省新华书店发行

开本787×1092 1/32 印张12.5 字数283,000

1984年11月第 一 版

1984年11月第一次印刷

印数：1—11,000

统一书号：15221·64

定 价： 2.00 元

内 容 提 要

热平衡测试技术是鉴定各种热力设备的热效率和提高能源利用率的重要科学方法。本书较详细地介绍了被测系统的划归、简化,测试模式和程序等内容;同时,对各类仪器仪表的选择、使用、误差修正、数据综合计算等实用技术均有具体的阐述。全书由两部分组成:第一部分是热工计算基础知识和热平衡的测试理论基础;第二部分是各测试项目的实用测试技术。另外,还附有必要的图表以供使用。

本书可供燃料、机械、化工、冶金、轻工、纺织等工矿企业从事能源测试工作和从事能源管理的人员阅读使用。

前 言

目前，我国的工业企业由于设备、技术、管理等方面的原因，能源的利用率一般都比较低，而且一般企业与先进企业之间的差距很大，许多能源白白地损失掉了。因此，抓好企业的节能，是促进“四化”建设的有力措施。

要搞好节能工作，首先应该对企业能源利用情况加以调查，调查的重要手段是进行热平衡测试，借以作出科学的分析，才能采取相应的节能措施。

热平衡测试虽然不是一项难度很大的技术工作，但要普遍开展热平衡工作，往往会遇到资料不足等的实际困难。现根据我们搞热平衡测试工作的一点经验和体会，收集了常用的测试方法、计算公式、仪器仪表、可比性指标以及测试结果的分析比较等内容，编写了这本资料，供从事能源工作的同事们参考。

在编写过程中，浙江省杭州燃料利用监测站黄永绥、浙江大学吴存真、杭州丝绸联合印染厂徐刚、浙江省节能服务公司顾锐善、洪积瑜以及“能源工程”编辑部朱萃汉等同志对本书的编写工作提出了宝贵意见；浙江省能源研究所肖心同志和浙江省节能服务公司缪永霖同志审阅了本书。杭州余热锅炉研究所周中也同志和浙江大学张学宏同志为本书作了校核，在此一并致谢。编者水平有限，书中肯定还会存在许多不足之处，敬请广大读者批评指正。

编 者

1984年1月

目 录

第一章 基础知识	(1)
1—1 温度和温标	(1)
(一)摄氏温标(2) (二)华氏温标(2)	
(三)热力学温标(2) (四)国际实用温标(3)	
1—2 压力及其单位	(3)
(一)大气压力(3) (二)工程大气压(4)	
(三)绝对压力与表压力(4)	
1—3 比重和比容	(5)
(一)比重(5) (二)比容(7)	
1—4 比热和热量	(8)
(一)热量的单位(8) (二)比热(8)	
(三)热量(10)	
1—5 热焓	(13)
1—6 水蒸气的性质	(14)
(一)气化热(14) (二)饱和蒸汽的含热量(15)	
(三)过热蒸汽(15)	
1—7 电能和化学能	(16)
(一)电能(16) (二)化学反应热(化学能)(17)	
1—8 当量热值和等价热值	(18)
(一)当量热值(18) (二)等价热值(19)	
第二章 热平衡与热量计算	(21)
2—1 热平衡概念	(21)
2—2 热平衡模型和热平衡式	(23)
2—3 热量计算常用公式	(29)

(一) 收入热量的计算公式 (29) (二) 支出热量的计算公式 (35)

第三章 锅炉热平衡 (53)

3—1 锅炉热效率 (53)

3—2 锅炉正平衡热效率试验 (59)

3—3 锅炉反平衡热效率试验 (66)

3—4 锅炉热平衡测试示例 (83)

(一) 试验目的 (83) (二) 试验组织 (84)

(三) 测点布置与测试仪器 (84) (四) 锅炉热平衡效率试验数据计算表 (86) (五) 试验结果分析 (91)

第四章 企业余热资源测定和余热锅炉热平衡 (92)

4—1 企业余热资源测定 (92)

(一) 高温烟气余热资源的测定 (92) (二) 高温

炉渣和高温产品余热资源的测定 (95) (三) 可燃

废气、废液余热资源的测定 (96) (四) 化学反应

余热资源的测定 (97) (五) 冷却水与冷却蒸汽余热的

测定 (97) (六) 废水、废汽余热资源的测定 (98)

4—2 余热锅炉热平衡 (101)

第五章 设备热平衡 (111)

5—1 设备热平衡概述 (111)

5—2 设备热平衡测试项目和热平衡表 (115)

5—3 设备热平衡测试示例 (119)

第六章 企业热平衡 (130)

6—1 企业热平衡的统计方法和表现形式 (130)

6—2 企业热平衡的技术经济分析 (138)

(一) 能源利用率 (138) (二) 单位产品耗能量 (138)

(三) 可比能耗成本 (139) (四) 单位产品可比能

耗成本 (140) (五) 余热资源百分比 (141)

- (六)余热利用率(141) (七)可重复利用热资源百分比和热重复利用率(141) (八)余热回收率(142)

第七章 燃料的取样与分析 (143)

7—1 煤样的采集和加工 (143)

(一)元素分析和发热量测定用的煤样(143)

(二)入炉原煤试样的采集(144)

7—2 元素分析项目和发热量 (145)

7—3 燃料基质换算和低位发热量换算 (147)

7—4 用工业分析值计算低位发热量的经验公式 (150)

7—5 燃煤的工业分析 (154)

7—6 燃煤粒度分析 (156)

7—7 燃煤量的计算 (157)

7—8 液体、气体燃料成分及发热量 (158)

7—9 台秤的校验 (159)

第八章 灰渣测定 (161)

8—1 炉渣的计量与取样 (161)

8—2 漏煤的计量和取样 (163)

8—3 飞灰的取样 (163)

8—4 灰渣含碳量的测定 (166)

第九章 烟气成分分析 (167)

9—1 三原子气体、氧气和一氧化碳的测定 (167)

(一)吸收液的配制(169) (二)烟气取样管及取

样(170) (三)奥氏分析器的操作使用(174)

(四)CO的比长检测管测定(176) (五)试验结果的
分析计算(178)

9—2 烟气中水分含量的测定 (179)

(一)冷凝法水分含量的测定(180) (二)重量法水分含

量的测定(182)

9—3 烟气含尘量测定 (184)

(一) 含尘烟气的取样(184) (二) 集尘器(186)

(三) 测量装置(187) (四) 测量方法(189)

(五) 试验结果计算(190)

第十章 温度的测量 (192)

10—1 玻璃温度计 (192)

10—2 半导体电阻温度计 (193)

10—3 光学高温计 (195)

10—4 热电偶温度计 (201)

(一) 热电偶的型号规格(202) (二) 热电偶的制

造(203) (三) 热电偶的安装与使用(207) (四) 热

电偶的校验(215) (五) 电位差计(217) (六) 电

子电位差计(219) (七) 动圈式测温毫伏计(222)

10—5 壁面温度的测量 (223)

(一) 固定式敷设测量(224) (二) 移动式测量(227)

10—6 提高烟气温度测量精度的几种措施 (228)

第十一章 流量的测量 (233)

11—1 涡轮流量计 (233)

(一) 涡轮流量计的性能与工作原理(233)

(二) 流量变送器的使用(239) (三) XSF-40 流

量指示积算仪的使用(240) (四) XJS-461 型流量

积算仪的使用(243)

11—2 差压式流量计 (245)

(一) 差压式流量计的原理和构造(245) (二) 差

压式流量计的安装(248) (三) 差压式流量计的误

差(250)

11—3 转子流量计 (253)

(一)流体的重度与标定值不同时读数的修正(254)

(二)对于气体介质的温度和压力的修正公式(256)

第十二章 气流速度的测量 (257)

12—1 静压与速度测量 (258)

(一)静压和静压测量(258) (二)45°集气管速

度测量(259) (三)喇叭口集气管速度测量(261)

12—2 全压与速度测量 (262)

(一)全压和全压测量(262) (二)等截面平直管

段的的速度测量(264) (三)笛形管速度测量(266)

12—3 测速管与速度测量 (267)

(一)带半球形头部的动压管的速度测量(267)

(二)靠背式动压管速度测量(269)

(三)“阿牛巴”(Annubar)测速管速度测量(272)

12—4 平面气流速度的测量 (274)

12—5 气流平均速度的测量 (279)

(一)测量点的选择(279) (二)气体重度的计

算(283) (三)平均速度计算(283)

12—6 测速管的标定 (285)

第十三章 压力的测量 (290)

13—1 液柱式压力计 (290)

(一)U形玻璃管压力计(290) (二)单管压力

计(292) (三)倾斜微压计(293)

13—2 弹簧管压力表 (296)

第十四章 蒸汽湿度的测定 (300)

14—1 氯离子滴定法 (300)

(一)氯离子的测定(300) (二)溶液配制(302)

(三)蒸汽和炉水的取样(303)

14—2 节流法测量蒸汽的湿度 (308)

14—3	重量法测定蒸汽湿度	(312)
附录一	地理位置及季节与大气压力参考表	(314)
附录二	常用固体材料的比重 (克/厘米 ³)	(316)
附录三	常用气体平均定压容积比热 c_p [大卡/标米 ³ · °C]	(317)
附录四	常用气体平均定压重量比热 c_p [大卡/公斤 · °C]	(318)
附录五	可燃气体的平均比热 c_p [大卡/标米 ³ · °C, 由 0 ~ t (°C)]	(319)
附录六	某些固体和液体物质的比热	(320)
附录七	1 米 ³ 空气和烟气以及 1 公斤灰的焓	(322)
附录八	水的比容和焓	(323)
附录九	干饱和蒸汽以及饱和线上的水的比容和焓	(328)
附录十	过热蒸汽的比容和焓	(331)
附录十一	燃料的分类	(353)
附录十二	几种不同油种的组成及发热量	(353)
附录十三	各种气体燃料的组成及发热量	(354)
附录十四	几种发生炉煤气的组成及发热量	(355)
附录十五	在 760 毫米压力下 空气饱和时水 蒸气压力 和含湿量	(356)
附录十六	铂铑 ₃₀ —铂铑 ₆ 热电偶分度表	(359)
附录十七	铂铑 ₁₀ —铂热电偶分度表	(366)
附录十八	镍铬—镍硅 (镍铝) 热电偶分度表	(372)
附录十九	镍铬—考铜热电偶分度表	(377)
附录二十	铁—考铜热电偶分度表	(381)
附录二十一	铜—康铜热电偶分度表	(384)
参考文献		(386)

第一章 基础知识

1—1 温度和温标

物体冷、热的程度，叫做温度。例如夏天热，冬天冷。温度高感觉“热”，温度低感觉“冷”。但物体温度的高低，不能单凭人的感觉来判断，例如手触感到物体的冷、热、烫，以肉眼观察炽热物体的颜色（见表1—1）不同等，都不能作为表征温度的尺度。衡量温度应使用仪器，这种仪器，叫做温度计。

表1—1 炽热物体的温度和颜色对照表

颜 色	温 度 (℃)	颜 色	温 度 (℃)
开 始 暗 红	525	淡 橙	1200
暗 红	700	白 热	1300
开始樱桃红色	800	亮 白	1400
樱 桃 红 色	900	白 热 带 火 花	1500
淡 樱 桃 红 色	1000	眩 目 的 白	>1500
深 橙	1100		

温度计用什么标准来分度呢？它是根据温标来分度的，温标是温度的数值表示。它规定了温度的读数起点（零点）和测量温度的基本单位。各种温度计的刻度数值均由温标确定。温标的种类很多，通常运用的有摄氏温标、华氏温标、热力学温标、国际实用温标等。

(一) 摄氏温标

在一个标准大气压力下，以水的冰点(即凝固温度)作为零度，水的沸点(即沸腾温度)作为100度，两温度之间等分100格，每格称为一摄氏度，用英文字母“ t ”表示。 $^{\circ}\text{C}$ 也就是摄氏温度的单位。例如：某容器中水温度42摄氏度，则写作“42 $^{\circ}\text{C}$ ”。其温度的刻度可以在0 $^{\circ}\text{C}$ 以下和100 $^{\circ}\text{C}$ 以上连续分度。但是在零度以下，在温度前应标以“-”号，读做“零下若干度”。

(二) 华氏温标

在一个标准大气压力下，以水的冰点作为32度，以水的沸点作为212度，在冰点与沸点之间等分180格，每格称为一华氏度，用英文字母“ F ”表示。 $^{\circ}\text{F}$ 是华氏温度的单位。这种温标为英制国家所采用，在我国除了少数地区和部门习惯应用外，基本上已全部采用摄氏温标了。

两种温标温度换算关系如下：

$$\text{摄氏温度} = \frac{5}{9} \times (\text{华氏温度} - 32) \quad (1-1)$$

$$\text{华氏温度} = \frac{9}{5} \times \text{摄氏温度} + 32 \quad (1-2)$$

例如锅炉除氧器温度计指示为215.6 $^{\circ}\text{F}$ ，折成摄氏温度为：

$$\text{摄氏温度} = \frac{5}{9} \times (215.6 - 32) = 102^{\circ}\text{C}$$

(三) 热力学温标

理论上能够达到的最低温度为零下273 $^{\circ}\text{C}$ (即-273 $^{\circ}\text{C}$ ，更精确地讲为-273.16 $^{\circ}\text{C}$)，把这一点温度称为绝对零度。单位符号用“ K ”表示。热力学温标又称开尔文温标，习惯上称作开氏温标。如果我们把这一最低温度当作零度，刻度的大小还是用

摄氏温度的刻度大小，那么读出来的温度数值，正好比摄氏温度大273，我们把这个温度叫做“绝对温度”，用符号“ T ”表示：

$$T = t + 273(K) \quad (1-3)$$

式中

t —— 摄氏温度值。

烟气体积换算公式中经常采用热力学温标。

(四) 国际实用温标

国际实用温标是一种国际协议性温标，它是用来复现热力学温标的。它主要规定了计量分度的基准点、基准仪器、温度插补关系等。热力学温标的量值是物体温度的真值，每个物体的热力学温度是一种客观的存在。人们对于该物体的温度测量是不断随着科学技术的发展和知识水平的提高而愈来愈趋近于真值的。自1927年建立国际实用温标以来，为了更好地符合热力学温标，对国际实用温标曾先后作了多次修改。

“1968年国际实用温标”(IPTS-68)规定以热力学温度为基本温度，用 T 表示，相应的单位是开尔文，符号为K。定义开尔文一度等于水的三相点热力学温度的 $1/273.15$ 。

目前我国生产的热电偶，其分度号LB-3、EU-2、EA-2等就是根据1968年国际实用温标规定分度的。

1—2 压力及其单位

所谓压力，就是作用于单位面积上的力，也称压强。测量压力的仪器，叫做压力计。

(一) 大气压力

气体是具有一定重量的。我们生活在空气包围着的环境

中，只是由于我们适应了这种环境，似乎感觉不到什么重量。既然空气是有重量的，它对地面就有一定的压力。

通过试验得知，在海平面，即海拔零米处，温度为 0°C 时，大气压力相当于760毫米高的水银柱的重量或等于每平方厘米面积上承受 $76 \times 13.6 = 1033.6$ 克重量。这个压力，叫做一个标准大气压（或称物理大气压），通常用 P_0 表示。

对不同温度和海拔高度，大气压力是不相同的，也就是说所处的地理位置和季节不同，大气压力也是不相同的，详见附录一。

（二）工程大气压

工程上为了计算方便，将每平方厘米面积上承受1000克的重量，叫做一个工程大气压，一般用公斤力/厘米²作为单位。因此

$$1 \text{ 标准大气压} = 1.0336 \text{ 工程大气压}$$

折合成 0°C 时的水银柱，一个工程大气压等于 73.56 厘米高。若以水柱表示，则每10米高的水柱为一个工程大气压。

凡是小于一个标准大气压或小于一个工程大气压的压力，称为负压力，并在压力的大小值前标以“-”号。

（三）绝对压力与表压力

从压力表上读出的压力数值，叫做表压力。而绝对压力是指作用在单位面积上所有的力，因此：

$$\text{绝对压力} = \text{表压力} + \text{大气压力} \quad (1-4)$$

为了计算方便，绝对压力取为等于表压力加 1 工程大气压（1 公斤力/厘米²）。因为表压力的指针为零时，实际上已有一个大气压力作用于压力表了。因此，为了求得实际的压力值（即绝对压力），压力表上的读数必须加上一个工程大气压。

常用压力单位之间的换算关系见表 1—2。

表1-2 压力单位换算表

压 力 单 位	标准大气压 (atm)	工程大气压 (at)	毫米汞柱 (mm Hg)	米 水 柱 (mH ₂ O)	磅/英寸 ² (P·S·I)
1 标准大气压	1	1.0336	760	10.336	14.696
1 工程大气压	0.9678	1	735.56	10.000	14.223
1 毫 米 汞 柱	0.00131	0.00136	1	0.0136	0.0193
1 米 水 柱	0.0968	0.1	73.556	1	1.4223
1 磅/英 寸 ²	0.0681	0.0703	51.715	0.703	1

1 — 3 比重和比容

(一) 比重

单位容积 (体积) 的物质所具有的重量, 叫做比重, 或叫重度, 并用符号 γ 表示, 单位为公斤力/米³。

用数学式表示为:

$$\gamma = \frac{G}{V} (\text{公斤力/米}^3) \tag{1-5}$$

式中

G —— 物体所具有的重量, 公斤力;

V —— 物体所具有的体积, 米³。

在液体、气体的速度计算中, 常会碰到流体密度 ρ 这个物理量, ρ 为 单 位 容 积 的 物 质 所 具 有 的 质 量, 即 $\rho = \frac{m}{V}$; 公斤/米³。由于质量的单位采用了公斤, 故工程上密度 ρ (公斤/米³) 与比重 γ (公斤力/米³) 是同一数值, 本文为简化起见, 把比重和密度统一用重度表示, 符号仍用 “ γ ”。

气体的体积随温度和压力变化很大, 为了在相对比较时排

除压力和温度的影响，通常用“标米³”表示气体的体积。这就是把气体温度为 0℃（有的也用 20℃），所承受的压力为 760 毫米汞柱的状态定为标准状态，此时 1 立方米气体的体积称为 1 标准立方米。

把承受的压力为 P 、温度为 t 的条件下的气体体积 V_p ，换算成标准状态下的气体体积时，可按下式换算：

$$V_0 = V_p \cdot \frac{273}{273+t} \cdot \frac{P}{760} = 0.359 V_p \cdot \frac{P}{273+t} \quad (1-6)$$

要把标准状态下的体积换算为工作状态下的体积，可按下式换算：

$$V_p = V_0 \frac{273+t}{273} \cdot \frac{760}{P} = 2.784 V_0 \frac{273+t}{P} \quad (1-7)$$

式中

V_0 ——标准状态下气体体积，标米³；

V_p ——工作状态下气体体积，米³；

t ——工作状态下气体的温度，℃；

P ——工作状态下气体的压力，毫米汞柱。

对于由几种不同成分的气体作物理混合而形成的混合气体的重度，可以按下式计算：

$$\gamma_{\text{混}} = \frac{1}{100} \sum_{i=1}^n y_i \gamma_i \quad (\text{公斤力/标米}^3) \quad (1-8)$$

式中

$\gamma_{\text{混}}$ ——混合气体的重度，公斤力/标米³；

y_i ——混合气体中 i 组分的容积百分数，%；

γ_i ——混合气体中 i 组分的重度，公斤力/标米³。