

水泥窑热工测量

(第二版)

建筑材料科学研究院 编著

中国建筑工业出版社

水泥窑热工测量

(第二版)

建筑材料科学研究院 编著

中国建筑工业出版社

本书较系统地介绍了水泥工业回转窑（包括窑外分解窑）和立窑热工测量方法、简要原理、主要仪器装置以及热工计算方法等。主要内容有：水泥窑气体温度、压力、流速、流量、含尘量及湿含量的测量；窑内物料温度的测量；烟气成分分析；燃料组成与燃烧计算；立窑热工测量；回转窑热平衡计算、测量与实例。较之第一版，第二版除补充了近几年来采用的新的测量方法和仪器外，水泥窑的热平衡测量和计算方法均依据新制订的国家标准进行介绍。

本书主要供水泥工业热工测量工作者、科技人员和院校师生使用，也可供其他工业热工测量工作者参考。

责任编辑：程佛根

水 泥 窑 热 工 测 量

（第二版）

建筑材料科学研究院 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：9 插页：1 字数：241千字

1987年6月第二版 1987年6月第二次印刷

印数：7,321—12,950册 定价：2.05元

统一书号：15040·5196

再 版 前 言

《水泥窑热工测量》一书，1979年第一次正式出版以后，很快就销售一空。近几年来，随着水泥企业科学管理水平的提高，以及对节能、环保工作的重视，经常有读者来函要求协助购买《水泥窑热工测量》一书或资料，这就是这次再版的直接原因。

本书第一版以后的几年中，情况又发生了很大的变化，原书中的一些测定方法已很少为人所用，同时又出现了一些新的测量方法和测量仪器，此外，水泥回转窑和机械立窑热平衡测量和计算方法的国家标准也已经制订出来，因此有必要对原书加以修改。第二版内容重编或修改较多的有第一章温度的测量，第三章流体流速和流量的测量，第四章气体含尘量的测量，第七章燃料的组成及燃料燃烧计算，第九章回转窑热平衡计算方法与实例。为了与新制订的国家标准相适应，书中的符号和单位均按GB 4179—84进行了统一。此外，根据读者需要，为计算方便起见，本版增加了较多的各类数据表格附在书后。

此次修订由谢泽执笔，刘旦参加了第一、二、三章的修改工作，最后由赵正一、黄南樾审阅。

由于时间仓促，加上编者水平所限，书中错误在所难免，恳望读者指正。

建筑材料科学研究院水泥研究所

1986年7月

第一版编者的话

本书是在原建筑材料科学研究院水泥热工室 1963 年编写的《水泥回转窑热工测量》讲义的基础上改编而成的。书中收集了现行的水泥回转窑和水泥立窑的热工测量方法及其简单原理，其中有气体温度、压力的测量；气流速度和气体量的测量；气体含尘浓度和湿度的测量；气体成分和物料温度的测量；以及按废气成分计算单位热耗的简便算法，燃料发热量的简便算法等。

通过这些测量，能以科学的数据综合分析窑的结构和热工制度的合理性，为实现高产优质低消耗提出改进的技术措施。

参加本书编写工作的有赵正一、黄南樾、郭富平、黄锦扬等。在编写本书过程中，曾得到许多水泥厂、科研设计单位以及大专院校的支持，提出很多宝贵的意见，在此表示感谢。

十几年来，热工测量方法和仪器，已有很大发展，但在这方面没有做新的研究工作，书中错误和不足之处，在所难免，希望读者予以指正。

建筑材料科学研究院水泥研究所

目 录

第一章 温度的测量	1
第一节 测温概念和测温仪表	1
一、测温概念	1
二、测温仪表	2
(一)膨胀式温度计	3
(二)压力表式温度计	4
(三)电阻温度计	5
(四)热电偶温度计	6
(五)辐射式高温计	16
(六)热流计	25
第二节 回转窑内气体温度的测量	28
一、由辐射热交换产生的误差	28
二、抽气热电偶	30
三、窑内气体温度的测量	36
第三节 入窑二次空气温度的测量	37
一、抽气热电偶测量法	37
二、从热平衡计算入窑二次空气温度	38
第四节 回转窑内物料温度的测量	41
一、用坩埚热电偶测量物料温度	41
二、用快速热电偶测量物料温度	41
三、用袋式测温器测量物料温度	43
四、用光电比色高温计测量回转窑烧成带物料温度	45
第五节 熟料温度的测量	46
一、出窑熟料温度的测量	46
二、出冷却机熟料温度的测量	47
第六节 表面散热损失的测定	48

一、测量表面温度的仪器	48
二、表面热损失的计算	51
第二章 压力的测量	59
第一节 概述	59
第二节 测量压力常用的仪器	61
一、液柱式压力计	62
(一) U型管压力计	62
(二) 单管压力计	63
(三) 倾斜式微压计	63
(四) 补偿式微压计	66
二、弹性式压力计	67
(一) 弹簧管式压力表	67
(二) 膜式压力表	67
(三) 霍尔微压计	68
第三节 回转窑上压力的测量	68
一、窑头和窑尾的负压测量	68
二、管道中气体压力的测量	70
三、测量压力时应注意的事项	73
第三章 流体流速和流量的测量	74
第一节 概述	74
第二节 速度式流量计	75
一、动压测速管	75
二、差压式流量计	97
三、转子流量计	102
四、涡轮流量计	105
五、靶式流量计	106
六、风速计	107
第三节 容积式流量计	110
一、湿式流量计	110
二、椭圆齿轮流量计	111
第四节 回转窑上气体流速和流量的测量	112
一、一次空气的测量	112
二、排风量的测量	115
三、二次空气的测量	116

四、窑头窑尾漏风量的测量	117
第四章 气体含尘量的测量	120
第一节 概述	120
第二节 测定仪器及设备	120
第三节 含尘浓度的测量方法及计算	127
第四节 介绍几种含尘量测定方法	129
一、稳定气流中含尘量的测定	129
二、不稳定气流中含尘量的测定	133
三、带收尘的取样嘴、流量计及抽气泵组成的测量系统	137
四、光学测尘法	143
第五章 气体湿含量的测定	144
第一节 概述	144
第二节 水蒸气吸收法	147
第三节 干湿球温度计法	148
第四节 冷凝法	154
第五节 自动干湿球温度计	155
第六章 烟气成分的分析	157
第一节 奥氏分析法	157
一、分析步骤	158
二、吸收剂的配制	159
三、烟气分析的一般要求	160
第二节 仪器分析方法	160
一、氧气自动分析器	161
二、二氧化碳自动分析器	163
三、红外线气体分析器	164
第三节 烟气的过剩空气系数	166
第四节 用烟气分析计算热耗	167
一、计算方法	167
二、计算实例	168
第七章 燃料的组成及燃料燃烧计算	170
第一节 燃料的组成	170
一、固体、液体燃料的组成	170
二、气体燃料的组成	171
第二节 燃料的发热量	172

一、发热量的概念	172
二、发热量的测定	174
三、发热量的计算	174
第三节 燃料燃烧气体量的计算	178
一、燃料燃烧所需空气量的计算	178
二、燃料燃烧时烟气生成量的计算	179
三、燃料燃烧的经验计算公式	180
第八章 立窑的热工测量	182
第一节 温度的测量	182
一、烟囱废气温度的测量	182
二、窑面各点废气温度的测量	183
三、高温带温度的测量	183
四、窑体表面温度的测量	185
五、出窑熟料温度的测量	185
第二节 窑内不同深度压力的测量	186
第三节 气体流量的测量	187
一、烟气废气量的测量	187
二、窑罩入料口和加料门漏风量的测量	187
三、卸料门漏风量的测量	188
四、入窑风量的测量	188
第四节 烟气含尘量的测量	188
第五节 烟气湿度的测量	189
第六节 烟气分析	189
一、烟囱废气成分的测量	189
二、窑面各点烟气成分的测量	190
第七节 窑内不同深度物料成分的测量	191
第九章 回转窑热平衡计算方法与实例	193
第一节 回转窑热平衡计算方法	198
一、条件	198
二、基准	198
三、物料平衡	198
四、热量平衡	202
五、窑的热效率计算	207
六、冷却机的热平衡与热效率计算	207

第二节 熟料形成热的理论计算方法	210
一、干原料消耗量的计算	210
二、吸收热量的计算	211
三、放出热量的计算	212
四、熟料形成热	213
第三节 回转窑热平衡测量与计算实例	213
一、各项热工参数的测定与计算	215
二、物料平衡计算	227
三、热平衡计算	229
四、窑的热效率计算	233
五、冷却机的热平衡与热效率计算	233
六、熟料烧成的综合能耗计算	235
附 录	238
一、化学元素表	238
二、工程单位制和国际单位制换算表	239
三、常用气体性质表	241
四、常用气体粘度表	243
五、常用气体平均恒压比热表	244
六、常用气体导热系数表	245
七、饱和水与饱和蒸汽压表	246
八、760mmHg压力下空气饱和时水蒸气压力和含湿量表	249
九、空气的相对湿度表	252
十、常用热电偶分度表	260
十一、常用耐火材料的主要物理性质表	271
十二、常用隔热材料的密度和导热系数表	272
十三、煤、石油、炉灰的比热及导热系数表	272
十四、燃料的平均比热表	273
十五、原料、生料、熟料、窑灰和煤灰的平均比热表	274
十六、生料、熟料组分的平均比热表	275
十七、熟料矿物组分的平均比热表	276
十八、水在不同温度下的汽化热表	277
十九、根据温度差和干温度计温度计算 x 的图表	277
二十、 $I-x$ 图(书末)	
参考文献	278

第一章 温度的测量

第一节 测温概念和测温仪表

一、测温概念

人们对环境或物体冷热的感觉和自然界中的热效应，在科学技术中是用“温度”这个物理量来描述的。因此，笼统地说，温度就是表征物体冷热程度的一个物理量。是工业生产和科学实验中最普遍、最重要的热工参数之一。

温度的数值表示法是通过建立“温标”来实现的，要分度温度计也必须先确定温标。温标明确了温度的单位。温标的种类很多，如摄氏温标、华氏温标和热力学温标（又叫“开尔文温标”或“绝对温标”）等。根据国际单位制的要求，温度要采用热力学温度单位“开尔文”。

热力学温度单位开尔文的定义为：1开尔文等于水三相点热力学温度值的 $1/273.16$ 。开尔文简称“开”，代号为K。热力学温标规定的温度值叫热力学温度，符号为 T 。

按热力学温标定义摄氏温度为：

$$t = T - 273.15$$

式中 t ——摄氏温度（ $^{\circ}\text{C}$ ），

T ——热力学温度（K）。

热力学温度与摄氏度的计算温度起点不同，但温度间隔或温差是一致的，既可用“开尔文”表示，也可用“摄氏度”表示，其量值相等。

测量温度对国民经济各部门都是必不可少的，它对于进行热平衡，提高热工设备的热效率，搞好安全生产和节约能源等，都是十分重要的。

温度不能直接加以测量，只能借助于冷热程度不同的物体之间的热交换，以及物体的某些物理性质随冷热程度不同而变化的特性来间接加以测量。

二、测温仪表

测量温度的仪表通常包括一次仪表（如热电偶、热电阻、半导体热敏电阻等）和二次仪表（如动圈式毫伏表、电子电位差计等）。由于测温仪表种类很多，分类方法也不一致，在实际应用上常把用来测量 600°C 以下的测温仪表称为温度计，而把测量 600

测温仪表的分类及优缺点

表 1-1

型式	测温范围	温度计种类	温度计的作用原理	优点	缺点
接触式仪表	$-200 \sim 500^{\circ}\text{C}$	膨胀式温度计	利用液体或固体受热膨胀的性质	结构简单，使用方便，价格低廉，测量准确	测量上限和精度受玻璃质量的影响，不能记录和远传
	$0 \sim 300^{\circ}\text{C}$	压力式温度计	利用封闭在固定容积中的气体、液体或某种液体的饱和蒸汽受热体积膨胀或压力变化的性质	结构简单，不怕振动，具有防爆性，价格低廉	精度低，测量距离较远时，仪表的滞后性较大
	$-200 \sim 500^{\circ}\text{C}$	热电阻计	利用导体或半导体受热电阻值变化的性质	精度高，便于远距离多点、集中测量与自动控制	不能测量高温，由于体积大，测量点的温度较困难
	$0 \sim 1600^{\circ}\text{C}$	热电偶计	利用物体的热电特性	测量范围广，精度高，便于远距离多点集中测量和自动控制	需冷端补偿，在低温段测量精度低
非接触式仪表	$600 \sim 2000^{\circ}\text{C}$	辐射式计	利用物体的辐射性质	感温元件不破坏，被测物体的温度场，测温范围广	低温段测量不准，受环境条件影响大，对测量值必须修正

°C以上的测温仪表称为高温计。根据测量方式的不同又可分为接触式仪表（如玻璃液体温度计、压力式温度计、双金属温度计、热电阻温度计和热电偶高温计等）和非接触式仪表（如辐射式温度计等）。表1-1归纳列出了各类测温仪表的特点及使用范围，以便于使用参考。

（一）膨胀式温度计

利用液体或固体受热膨胀的性质制作的温度计叫膨胀式温度计。

用于热工测量的最常见的液体温度计是玻璃水银温度计和玻璃酒精温度计，在水泥生产与热工测量中，它常用来测量0~500°C的温度，如环境温度，蒸汽温度，生料、煤粉、油及煤气等温度，其主要优点是构造简单，使用方便，价格便宜。若玻璃毛细管内充以氮气，并采用石英玻璃管则可测量到700°C的温度。当玻璃管内充以低凝固点的液体时，则可测量-200°C的温度。

在使用玻璃温度计时应注意以下几点：

（1）使用前必须经过校正，尤其是用了较久的温度计。否则由于零点漂移或内有小泡等原因而造成测量误差。

（2）温度计不宜平放和平装。保存和安装时都应使玻璃温度计直立，且测温包应在下面。

（3）使用时检查液柱是否脱离，测温包内是否含有气泡。液柱脱离可以缓慢加热或轻微振动来消除。如果测温包内进入气泡应将温度计置于低温，使液体进入温包，然后轻轻抖动使气泡逸出。

（4）对于全浸入式温度计，安装深度应能满足要求。对于工业用的玻璃温度计，则应将尾部全部插入被测介质中，否则会产生误差。

（5）测量流体温度时，温度计应逆流方向安放或与流向垂直或有一定倾斜角，不能顺向安置，而且测温套管的插入深度要达到中心线。具体安装位置如图1-1所示。

固件膨胀式温度计是基于固件长度随温度而变化的性质制成

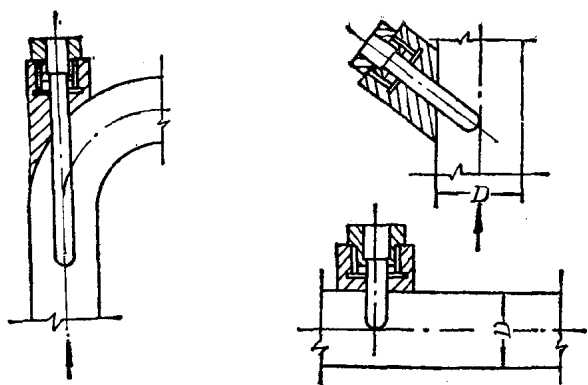


图 1-1 测温安装示意图

的。常用的有双金属温度计及杆式温度计。

(二) 压力表式温度计

压力表式温度计的测温原理是利用封闭容器中的液体、气体或某种液体的饱和蒸汽随温度的变化，其体积或压力也相应变化这一性质制成的，并用压力表来测量这种变化，从而测得温度。

压力表式温度计的结构如图1-2所示，它由感温元件（温包和接头管）、毛细管和盘簧管（或弹簧管）等元件构成一个封闭系统。系统内充填气体、液体或低沸点液体的饱和蒸汽，故压力表式温度计可分为液体压力温度计、气体压力温度计和蒸汽压力温度计三种类型。

压力表式温度计结构简单，防震，可以远距离测量，并可制成自动记录式的。但损坏后很难修理，不能测点的温度和表面的温度。

国产WTQ型气体压力温度计，可以用来指示或记录热工设备中的气体、蒸汽或液体的温度。测温范围有 $0\sim 120^{\circ}\text{C}$ ， $0\sim 160^{\circ}\text{C}$ ， $0\sim 200^{\circ}\text{C}$ ， $0\sim 300^{\circ}\text{C}$ 。

使用压力表式温度计时必须注意以下几点：

(1) 感受部分必须全部浸入被测介质中，如图1-3所示。一般，指示的温度大致和温包浸入被测介质中的长度成比例，因

为测温时热量会通过毛细管或外壳向外散失而带来误差。

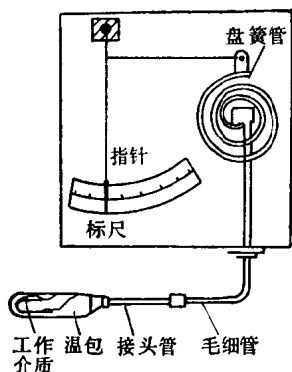


图 1-2 压力表式温度计

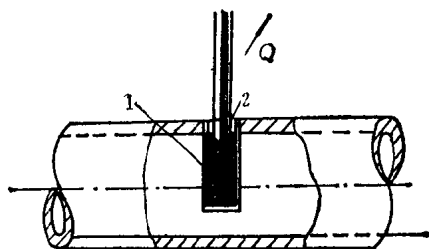


图 1-3 感受部分全部浸入流体

1—温包；2—接头管

（2）环境温度的变化会产生测量误差，这除了在结构上采取把温包容积做得比毛细管和弹簧管的容积大得多以及采用补偿毛细管和弹簧管等措施外，对于蒸汽式压力表温度计不宜测量环境温度附近的介质温度，因为此时毛细管及弹簧管中的蒸汽会产生完全冷凝（被测温度高于环境温度时）或完全气化（被测温度低于环境温度时）的不稳定情况，当温包和弹簧管位置不在同一水平高度时，就很难断定示值中是否存在液柱高度误差。

（3）液体压力表式温度计安装时，如果温包与压力表相对位置高度不同，毛细管中的液柱高度对压力表将施加一个正的或负的压力而产生较大的附加误差。

（三）电阻温度计

电阻温度计也是目前应用较多的测温仪表，可以测量 $-120^{\circ}\text{C} \sim +500^{\circ}\text{C}$ 范围内的温度，通常用来测量给水温度、油温、排烟温度、蒸汽温度等。它的优点是：

（1）电阻温度计比其它测温元件有较高的精确度，如 630°C 以下的温度是以铂电阻温度计作为基准温度计。

（2）灵敏度高，输出的信号强，容易测量显示。

(3) 电阻与温度之间具有较好的线性关系, 且复现性和稳定性都较好。

(4) 热电阻虽体积大, 热惯性大, 不能测个别点的温度, 但能测出一个区域内的平均温度。

(5) 半导体热敏电阻 体积很小, 灵敏度高, 测量非常方便。

电阻温度计的作用原理是基于导体(或半导体)的电阻值随温度变化而变化的性质, 将电阻值的变化用显示仪表反映出来, 从而达到测温的目的。大多数金属材料当温度升高 1°C 时, 其电阻值要增加 $0.4\sim 0.6\%$ 。而半导体材料的电阻则随温度升高而降低。

电阻温度计是由下述部分组成的:

(1) 受热部分: 一般称热敏元件, 有金属热敏电阻和半导体热敏电阻。

(2) 测量电阻的二次仪表: 实验室中用平衡电桥和电位差计, 工业上用不平衡电桥和比率计等, 有指示型和自动记录型。

热电阻元件主要是用铂丝或铜丝绕制的。铂电阻丝的直径约为 $\phi 0.07$ 毫米, 铜电阻丝约为 $\phi 0.1$ 毫米, 通常是绕在特制的云母片骨架上或包有绝缘材料金属管上, 装入保护套管内, 如图1-4(a、b)所示。它的技术参数列入表1-2内。

铂铜热电阻元件技术参数

表 1-2

热电阻种类	精度等级	分度号	0°C 电阻值和允许误差(Ω)	100°C 时电阻值和 0°C 时电阻值之比和允许误差	长期使用温度($^{\circ}\text{C}$)
铂热电阻	II	BA_1	46 ± 0.046	1.391 ± 0.001	$-200\sim +500$
		BA_2	100 ± 0.1		
		BA_3	300 ± 0.3		
铜热电阻	II	G	53 ± 0.053	1.425 ± 0.002	$-50\sim +100$

(四) 热电偶温度计

热电偶是目前工业上及热工测量中应用最广泛的温度传感

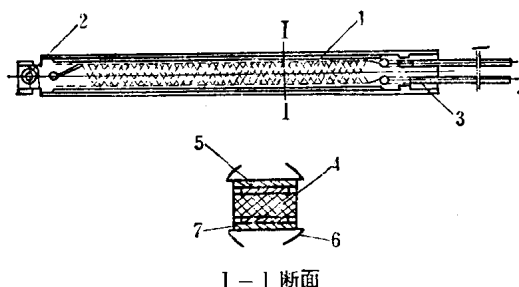


图 1-4a 铂热电阻敏感元件

1—铂热电阻丝；2—铜衬钉；3—银导线；4—夹持件；5—绝缘片；6—传热片；7—热电阻骨架



图 1-4b 铜热电阻敏感元件

1—铜导线；2—补偿绕阻或引线；3—铜电阻丝；4—塑料骨架

器，一般用于测量 500°C 以上的高温，普通热电偶的测温上限可达 1300°C （长期用时）至 1600°C （短期用时），特殊材料制成的热电偶甚至可测量 $2000\sim 2800^{\circ}\text{C}$ 的高温。热电偶是一种发电型传感器，它将温度信号转换成电势（毫伏）信号，配以测量毫伏信号的仪表或变换器，便可以实现温度的测量或温度信号的变换。

在水泥厂中，热电偶高温计常用来测量烟气、蒸汽、空气、物料、燃料及窑壁等温度。它测量范围广，一般可测 $-100\sim +1600^{\circ}\text{C}$ ；热惰性小，并可以远距离测量和自动记录。

其缺点是热电偶元件易受化学侵蚀，热电偶的冷端温度对测量有很大影响，必须注意加以校正。

热电偶高温计的组成如图1-5所示。

1. 热电偶的基本原理：

热电偶是由两根不同材料的导线（热电极）构成的，其一端互相连接（热端），另一端称为自由端（冷端），当两端的温度