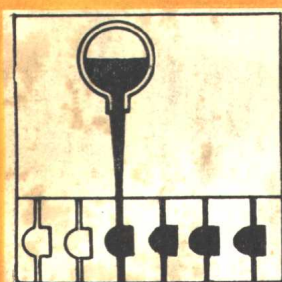
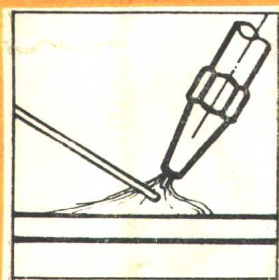
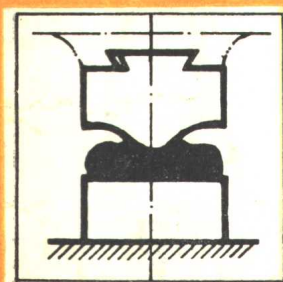
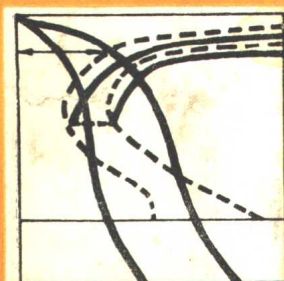


高等学校试用教材



炉温仪表与热控制

武汉工学院李均宜 主编



机械工业出版社

高等学校试用教材

炉温仪表与热控制

武汉工学院李均宜 主编



机械工业出版社

101

炉温仪表与热控制

武汉工学院李均宜主编

机械工业出版社出版 (北京阜成门外百万庄南街一号)
(北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ · 印张 10 · 字数 236 千字
1981 年 7 月北京第一版 · 1982 年 4 月北京第二次印刷
印数 10,001—17,000 · 定价 1.10 元

统一书号: 15033·5018

前 言

本教材是根据 1978 年高等学校一机部对口专业座谈会确定的计划及同年金属材料与热处理专业教材编写会议制订的《炉温仪表与热控制》教材编写大纲编写的。主要内容包括热处理炉温测量仪表与温度控制方法两个方面,除绪论外,共分七章和三个附录,各章顺序为:热电偶与热电阻、动圈式温度仪表、电子自动平衡指示调节仪表、辐射式测温仪表、数字式温度仪表简介、热处理炉温的自动控制、热处理的温度测量技术以及仪表的选用,附录 I 为红外线气体分析仪,附录 II、III 分别为热电偶与热电阻的分度表。

编写本教材时注意总结了近几年来各兄弟院校在有关课程的教学与教材编写方面的经验,力图遵循理论与实践结合的原则,通过介绍几类常用测温仪表与控温装置的基本结构、工作原理和使用方法,着重阐述基本概念和物理过程,概括有关的基本技术知识,并适当反映了国内外的先进技术。其中基本内容部分大体上可供 50 学时左右讲授和安排一定的实验。此外编入带“*”号的内容和附录 I(红外线气体分析仪)可供各校根据具体情况作适当的取舍。

本教材由武汉工学院李均宜主编,吉林工业大学温书田主审。其中绪论、第一、二、三、四、六、七章由李均宜编写,第五章及附录 I 由温书田编写。

本教材编写过程中,承蒙参加审稿会议的山东工学院、上海工业大学、吉林工业大学、西安交通大学、陕西机械学院、浙江大学等院校教师代表,以及华中工学院、华南工学院、洛阳农机学院、武汉工学院热处理教研室、自动化仪表教研室的有关教师,在审稿会前后及审稿会上,对编写纲目或初稿作了认真的审阅,提出了许多宝贵的意见。武汉工学院陈铁群、周一志、陈礼光等同志为本教材的编写收集、整理和审核了许多资料,并为完成编写出版做了许多工作;吉林工业大学许德慰、武汉工学院游凤荷、肖鸿、祁兵、范宏利等同志协助完成了本教材图表的编绘。

此外,本教材编写还得到长春第一汽车制造厂、武汉温度计厂、四川仪表总厂和上海工业自动化仪表研究所等单位的热诚支持和帮助。在此,对所有为本教材的审阅并提出宝贵意见以及在编写出版过程中给予热诚支持与帮助的单位 and 同志,表示衷心的感谢!

由于水平所限,编写仓促,不妥和错误之处,在所难免,衷心欢迎读者批评指正。

主要符号说明

1. 文字符号	P 功率; 比例作用
A 安培表; 电流单位安培	p 脉冲
a 可控硅元件的阳极	Q 热量; 电荷量
B 变压器	R 电阻
b 晶体管基极	SCR 可控硅元件
C 电容器; 容量; 接触器线圈及其触头	T 周期; 晶体管; 绝对温度
C_D 微分电容	t 时间; 摄氏温度
C_I 积分电容	T_d 微分时间
$^{\circ}C$ 摄氏温度单位	T_i 积分时间
c 晶体管集电极	U 直流电压; 正弦交流电压的有效值
D 半导体二极管; 微分作用	V 直流电压、正弦交流电压有效值的单位, 伏特; 伏特表
D_W 稳压管	u 交流电压瞬时值
E 电动势	W 能量
$E_{(t, t_0)}$ 热电偶热端为 $t^{\circ}C$, 冷端为 $t_0^{\circ}C$ 时发生的热电势	X_L 感抗
e 晶体管发射极	X_C 容抗
f 频率	Z 阻抗
G 检流计	α 电阻平均温度系数
g 可控硅元件的控制极	β 反馈系数
I 直流电流; 积分作用	Δ 仪表不灵敏区; 绝对误差
J 继电器线圈及其触点; 滑线电阻的滑动触点	δ 比例带; 相对误差
K 开关; 电压放大倍数; 绝对温度单位开尔文; 电阻值单位千欧姆	$\Delta\sigma$ 偏差
K_P 比例系数	ρ 电阻率
k 可控硅元件阴极	Ω 电阻单位欧姆
L 自感系数; 电感量	ω 角频率
M 互感系数	2. 文字符号的下标
mA 电流单位毫安	m 串联
mV 电压单位毫伏	d 动圈
N 线圈的匝数; 脉冲数	L 负载
n 可控硅在设定周期内导通的周波数	i 输入, 内阻
	o 输出, 外接

目 录

绪论	1	§ 3-5 电子自动平衡指示调节仪表的安装 与抗干扰	50
§ 0-1 温度与温标	1	一、仪表的安装	50
§ 0-2 温度测量与控制系统的基本结构	2	二、仪表的抗干扰	51
§ 0-3 温度仪表的分类	4	*附、手动直流电位差计及其使用	52
第一章 热电偶及热电阻	5	第四章 辐射式测温仪表	57
§ 1-1 热电偶及其补偿导线	5	§ 4-1 辐射测温的物理基础及其基本方法	57
一、热电偶的工作原理	5	一、辐射测温的物理基础	57
二、常用热电偶的结构及特性	8	二、辐射测温的基本方法	59
三、热电偶冷端温度的影响及补正	9	§ 4-2 全辐射高温计	60
四、热电偶补偿导线	10	一、全辐射高温计的基本结构与工作原 理	60
五、热电偶使用注意事项	11	二、全辐射高温计的安装及使用	61
*六、热电偶的焊接方法	12	§ 4-3 光学高温计与光电高温计	62
§ 1-2 热电阻	13	一、光学高温计及其局限性	62
一、热电阻的工作原理及基本结构	13	二、光电高温计的基本结构与工作原 理	63
二、热电阻使用注意事项	14	*§ 4-4 红外测温及其敏感元件	70
第二章 动圈式温度仪表	16	一、红外测温	70
§ 2-1 动圈式温度仪表的结构和工作原理	16	二、红外测温用敏感元件	71
一、测量机构	17	三、红外单通道比色温度计	72
二、XCT-101 型仪表的调节电路分析	20	第五章 数字式温度仪表简介	75
§ 2-2 动圈式温度仪表的调校与使用	24	§ 5-1 变送器	75
一、XCT-101 型仪表的调校	24	§ 5-2 积分脉冲调宽法 V-T 型电压-数字 转换器	76
二、仪表的使用	26	§ 5-3 时间间隔-数字的转换	78
第三章 电子自动平衡指示调节仪表	27	§ 5-4 十进制计数器	79
§ 3-1 电子自动平衡指示调节仪表的基本 结构及工作原理概述	28	§ 5-5 寄存器、译码器和数码显示器	82
§ 3-2 电子电位差计与自动平衡电桥的测 量电路	29	第六章 热处理炉温的自动控制	84
一、电子电位差计的测量电路	29	§ 6-1 位式炉温调节系统	84
二、自动平衡电桥的测量电路	33	一、二位式自调系统	84
§ 3-3 JF-12 型放大器的电路分析	34	二、三位式自调系统	86
一、变流级	34	三、超前位式自调系统	87
二、电压放大级	39	§ 6-2 连续 PID 调节的基本概念	88
三、相敏功放级	41	一、比例(P)调节特性及其实现方法	88
§ 3-4 电子自动平衡指示调节仪表的校验、 调整与维修	44	二、比例积分(PI)调节特性及其实现方 法	92
一、仪表的校验	44		
*二、仪表的调整	46		

三、比例积分微分(PID)调节特性及其实现方法	95	二、固体表面温度的测量	123
*四、正作用和反作用	98	三、温差的测量	124
*§ 6-3 连续 PID 调节器的电路分析	98	§ 7-3 炉温测量的误差分析与温度仪表的选用	125
一、给定发讯装置	99	一、有关误差分析的几个概念	125
二、TF-10A 调节放大器	99	二、影响炉温测量准确度的因素	126
三、反馈电路	104	三、热电偶的检定和热电偶与二次仪表的成套检定	126
四、调节器的手动电路和自动跟踪	104	四、炉温仪表选用的一般原则	128
§ 6-4 PID 调节器的使用和 PID 炉温自调系统	105	附录	130
一、PID 调节器的使用	105	I. 红外线气体分析仪	130
二、PID 炉温自调系统	110	一、测试原理	130
§ 6-5 炉温的准连续调节	116	二、仪器系统结构	131
一、准连续调节的基本概念	116	三、仪器的安装环境与安装时注意事项	135
*二、XCT-131 型时间比例调节仪表的工作原理	118	II. 热电偶温度与毫伏对照表	135
第七章 热处理的温度测量技术以及仪表的选用	120	铂铑-铂热电偶分度表	135
§ 7-1 常用热处理炉温度的测量方法	120	镍铬-镍硅(镍铬-镍铝)热电偶分度表	139
一、箱式炉温度的测量方法	120	镍铬-考铜热电偶分度表	142
二、气体渗碳炉及井式氮化炉温度的测量方法	121	III. 热电阻分度特性表	144
三、盐浴炉温度的测量方法	121	WZB 型铂热电阻分度特性表(一)	144
*§ 7-2 热处理中特殊温度的测量方法	122	WZB 型铂热电阻分度特性表(二)	147
一、高、中频感应加热工件的温度测量	122	WZB 型铂热电阻分度特性表(三)	149
		WZG 型铜热电阻分度特性表	150
		主要参考文献	150

绪 论

科学技术是人们对自然界客观规律的认识和运用。科学技术的发展,是和测量技术的发展密切联系在一起的。测量技术的水平愈高,科学技术的发展就愈为深广(当然,科学技术的发展,又为测量技术的发展提供新的前提和新的可能性)。金属材料及热处理也不例外:研制新材料,制订新工艺,必须借助温度测量、成分分析等许多测量与控制仪表以获得必要的参数;热处理车间的生产则必须依靠上述仪表来全面了解工艺过程的状况并加以控制,保证最佳工艺过程的实施,获得尽可能高的质量指标和经济指标。用最先进的自动化仪表与设备组成自动化系统,对工艺参数(首先是炉温)实行精确的、自动的测量与控制是不断提高热处理工艺水平的不可缺少的条件。因此,作为热处理工程技术人员,正确掌握炉温测量与控制技术是非常必要的。

《炉温仪表与热控制》将着重介绍热处理炉温仪表的基本结构、工作原理以及使用这些仪表进行炉温测量与控制的方法。此外,鉴于热处理炉内气氛的检测与控制对热处理产品质量显得愈益重要,因此,本书的附录介绍了一种碳势测量与控制的仪表——红外线二氧化碳气体分析仪。

§0-1 温度与温标

温度是表征物体冷热程度的一种物理量,它反映了物体内部微粒(分子或原子、离子、电子)无规则运动(或振动)的平均动能。物体愈热,温度愈高,这些微粒运动的平均动能也就愈大。物体微粒的动能、势能等能量的总和构成了它的内能。因此,温度又是体现物体内能的一个重要参数。

温标是衡量温度高低的标尺。温度变了,物体的物理、化学性能和机械性能都将不同程度地发生变化。因此,一方面有必要建立适当的标尺来衡量温度的高低,以便科学地描述物体的各种性状随温度的变化关系;另一方面,我们可以适当地选择一个随温度有显著变化的物理量来建立温度标尺,用以计量温度。但是,能正确反映温度的客观实际的温标,应该不受温标工作物质的影响,符合这种要求的只有所谓“热力学温标”,而“热力学温标”是纯理论性的温标,直接用实验方法来实现这种温标是不可能的,但可以通过一些途径建立起一种实际可行而又尽可能与“热力学温标”相一致的温标,这就是“国际温标”。随着科学技术的发展,“国际温标”几经修改,目前国际上通用的是《1968年国际实用温标》(ITS-68),它与理想的“热力学温标”比较接近,我国已从1973年元月1日起开始正式采用。

《1968年国际实用温标》的主要内容如下:

1. 指定 11 种纯物质的三相点(气、液、固态三相共存的温度):

平衡氢三相点	-259.34°C
平衡氢液态气态平衡点	-256.108°C
平衡氢沸点	-252.87°C

氮沸点	-246.048°C
氧三相点	-218.789°C
氧沸点	-182.962°C
水三相点	0.01°C
水沸点	100°C
锌凝固点	419.58°C
银凝固点	961.93°C
金凝固点	1064.43°C

2. 规定了在不同温度范围内使用不同的基准温度计：在金凝固点(1064.43°C)以上用基准光学高温计来确定温度；从 630.74°C~1064.43°C 范围内用基准铂铑-铂热电偶来确定温度；在 630.74°C 以下则用基准铂电阻温度计来确定温度。

3. 在定义固定点之间的温度由各基准温度计的示值(如铂电阻温度计的电阻值，铂铑-铂热电偶的热电势等)，按规定的插补公式来进行计算。

«1968 年国际实用温标»有两种温度：国际实用开尔文温度和国际实用摄氏温度。 T 代表国际实用开尔文温度，单位是开尔文，符号为“K”。 t 代表国际实用摄氏温度，符号为“°C”。 T 和 t 的关系为：

$$t(^{\circ}\text{C}) = T(\text{K}) - 273.15 \text{ K} \quad (0-1)$$

例如，在标准大气压下水的三相点温度，用国际实用摄氏温度表示为 0.01°C，用国际实用开尔文温度表示为 $0.01 + 273.15 = 273.16 \text{ K}$ 。可见两种温度没有本质上的差别，只是计算温度的起点不同，开尔文温度的起点是所谓“绝对零度”，而摄氏温度的起点是水的冰点，所以，彼此只相差一个常数 273.15，可以互相换算。

目前，欧美一些国家还采用一种华氏温度表示法，符号为“°F”。分度方法是將水银温度计在标准大气压下纯水的冰点定为 32°F，沸点定为 212°F，中间分为 180 等分，每一等分称为华氏 1 度，华氏温度和摄氏温度的近似换算关系为

$$F(^{\circ}\text{F}) = \frac{9}{5} t(^{\circ}\text{C}) + 32 \quad (0-2)$$

式中 t ——摄氏温度数；

F ——华氏温度数。

§ 0-2 温度测量与控制系统的的基本结构

热处理工艺的最佳过程，首要的是按照工艺规范对热处理炉温度进行测量和控制，使其以一定的精度保持某一定值或按一定的规律变化。炉温的测量必须借助适当的测温仪表，炉温的控制方法则可以是人工的，也可以是自动的。为了提高产品质量和生产效率，为生产活动和科学实验更高级程度的发展提供新的基础，我们必须用更精确的自动控制来代替人工控制。

自动控制和自动测量是分不开的。因而他们和其它环节一起就组成了炉温的自动测量与控制系统。如果不仅温度，而且其他所有参数以及整个热处理工艺过程都由电子计算机进行自动探测、分析、综合、数据处理，实现过程的闭环控制，这样就形成了热处理工艺过程较高级度的自动化系统。

炉温自动测量与控制系统的的基本结构如图 0-1 所示。其工作情况简述如下:

炉子的温度是由输送给它的能量多少决定的, 输入能量的波动或炉子启闭等扰动会造成炉温的变化, 如果需要将炉温稳定在某一个给定值, 就必须及时补偿输入能量的波动和克服各种扰动, 使炉子输入能量与耗散能量保持动态平衡。图 0-1 所示炉温测量与控制系统中, 温度变送器(包括感温元件, 如热电偶)将炉温转换成相应的信号(如热电偶的热电势)并送入显示记录仪表的测量机构, 由显示记录机构指示出炉温的瞬时值和记录下炉温的变化情况。与此同时, 在调节器内, 将测得的炉温与给定值进行比较, 得出偏差值, 偏差值(或称偏差信号)送入调节机构, 由调节机构发出相应的调节信号驱动执行机构动作, 从而改变能源(电源或油、气燃料)输送给炉子的能量, 偏差不消除, 执行机构将一直动作下去, 直至偏差消除、炉温被控制在某一给定值时为止。这个自动测量与控制系统, 相对于整个热处理工艺的自动化系统来说, 因为它的功能局限于炉温的测量与控制, 一般称之为炉温的自动调节系统。为叙述上的方便, 本书对“自动控制”与“自动调节”的含义不作严格的区分。

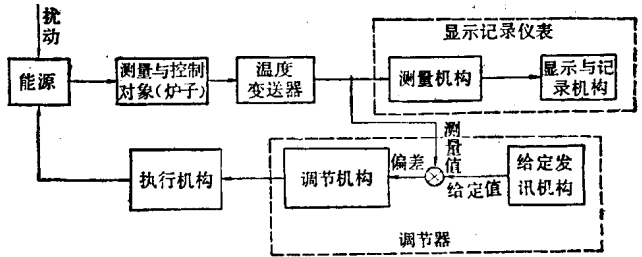


图 0-1 炉温自动测量与控制系统示意图

由此可见, 热处理炉温自动测量与控制系统包含有如下几个基本组成部分:

1. 测量与控制对象(调节对象, 即炉子)。
2. 温度变送器, 包括感温元件(或称敏感元件, 检测器, 这些术语在本书中通用)以及对温度信号作适当处理的电路。最简单的变送器就是感温元件本身, 常用的感温元件有热电偶, 热电阻以及一些热敏、光敏元件等。
3. 测量、显示、记录仪表, 它的种类很多, 在下节另作概要介绍。
4. 调节器, 包括给定发讯机构和调节机构。最简单的调节器是带电接点的位式调节机构, 一般调节器是指具有较精密的调节功能的调节电路。
5. 执行机构, 通常有可控硅调压器、调功器或继电器接触装置以及调节阀门等。

自动调节系统中的各个组成部分, 除测量与控制对象外, 它们形成相应的仪表。金属热处理炉温自动调节系统的仪表, 绝大多数都是电动调节仪表。电动调节仪表按其结构形式可分为基地式仪表和单元组合式仪表两大类。一般地说, 基地式仪表是以测量显示仪表作为主体, 附加调节器(有的还附加执行机构)而组合成的一个整体, 因而它结构紧凑, 安装使用都较方便, 但这种仪表要求特定的变送器(如一定型号规格的热电偶)与之配套, 只能用于专一参数(温度)的测量与调节。单元组合式仪表则把自动调节系统中的各个环节(如测量、显示、调节器等)分别设计制造成为具有独立作用的单元, 彼此间以统一信号互相联系。它们不仅可以按照生产工艺的需要灵活地加以组合而构成各种单参数或多参数的自动调节系统, 而且可以方便地和数据处理装置、工业控制计算机等配合使用, 在热处理工艺更全面的自动化中显示出它的优越性。但是, 由于基地式仪表具有它自己的特点, 在自动化系统中仍然具有相当的生命力, 热处理生产所用的仪表大多数就是基地式仪表, 而且掌握了基地式仪表的基本知识, 也就不难了解单元组合式仪表。因此, 基地式仪表是本书介绍的主要内容。

无论是基地式仪表还是单元组合式仪表, 它们都必须有一个变送器将被测量与被调节量

(温度)转变为测量显示仪表与调节器所能接受的信号,这类变送器一般称为一次仪表,而测量显示仪表与调节机构等单元称为二次仪表。

§ 0-3 温度仪表的分类

目前,热处理车间使用的仪表多为基地式仪表。这类仪表,型式繁多,可以按其测量方法、具备的功能、显示的方式和测量范围作如下的分类:

一、按测量方法分类

(1) 接触式测温仪表——测温时其感温元件(如热电偶)直接置于被测温度场(或介质)中。这类仪表的优点是使用方便,测量准确,但测量范围受到限制,主要是感温元件的材料在高温下的稳定性差,容易变形乃至被熔化。到目前为止,1600℃以上用接触式仪表测量就比较困难了。属于这类的仪表有膨胀式温度计,压力表式温度计,电阻温度计和热电式高温计等;

(2) 非接触式测温仪表——测温时其感温元件不与被测温度场(或介质)相接触。它是利用被测物体的热辐射性能(或其他性能)与温度的关系而工作的。从理论上讲,这类仪表的测温上限不受限制。但是相对于接触式仪表,它的测温准确度较差,使用不甚方便。属于这类的仪表有光学高温计、全辐射高温计、红外比色温度计等。

二、按具备的功能分类

(1) 指示记录调节仪表——除指示被测温度外,还可以记录温度并附加调节器,可对炉温进行自动调节。它的精度较高,又便于组成温度自动调节系统,但它结构比较复杂,使用、维护的技术要求较高。属于这类的仪表有动圈指示调节仪(无记录)、电子电位差计、光电高温计、比色温度计等。

(2) 指示仪表——只具有指示被测温度的功能。它的结构比较简单,便于使用和维护。属于这类的仪表有一般的水银温度计、XCZ动圈仪表等。

三、按显示方法分类

(1) 模拟显示式仪表——被测温度值是用指针偏转角度(或移动距离)等方式显示的。目前普遍使用的仪表即属此类。

(2) 数字显示式仪表——被测温度直接用数字显示。它不仅精度高,显示明确,而且便于和工业控制计算机配合实现热处理工艺过程的自动化。但它结构复杂,造价高,技术要求也高,有待逐步推广使用。

四、按测温范围分类

(1) 温度计——测量温度在500~600℃以下者,如玻璃液体(水银、酒精)温度计、电阻温度计、压力温度计等。

(2) 高温计——测量温度在500~600℃以上者,如热电高温计、光电高温计等。

上列各类仪表中,当前热处理车间使用最广泛的是模拟显示式热电高温计,其中主要是XCZ系列动圈式仪表和XW系列自动平衡指示调节仪。

此外,单元组合式仪表也有接触式和非接触式仪表以及高温和低温仪表之分。目前常见的电动单元组合式仪表有DDZ-II和DDZ-III等类型。DDZ-III型电动单元组合式仪表是我国自行设计制造的、以集成电路为主的较为先进的仪表。随着自动化水平的提高,单元组合式仪表必将越来越多地装备在热处理的自动化生产上。

第一章 热电偶及热电阻

热电偶和热电阻是接触式测温仪表中常用的两种感温元件。

热电偶是将温度转换成电势(热电势)的一种感温元件,配之以二次仪表,通过测量热电势从而测定温度值。热电偶结构简单,性能稳定,使用方便,测量精度高,测温范围广,它比热电阻应用得更为普遍。但热电偶在低温段的温度——热电势线性度较差,尤其在 0°C 以下温度的测量,热电偶就更为困难了。

热电阻是利用物质在温度变化时其电阻值发生变化的性质而制成的一种感温元件,二次仪表通过电阻值的测量从而测定温度值。它同样具有结构简单、测温精确、使用方便等优点,但其测温范围局限于低温段,测温上限较高的铂电阻,通常也不超过 650°C 。重要的是它可以方便地测量 0°C 以下的温度。如铂电阻,测温下限可达 -200°C ,而且线性度很好。在金属材料及热处理工艺的科学研究与生产上,低温段的测量,特别是“冷处理”设备中 0°C 以下低温的测定,采用热电阻作感温元件是比较理想的。

§ 1-1 热电偶及其补偿导线

一、热电偶的工作原理

根据电子理论的观点,当两种金属 A 、 B 接触时(见图 1-1),由于这两种金属的电子逸出功(金属电子逸出其表面所需的最小能量)和自由电子密度(单位体积内的自由电子数目)不同,金属中作不规则热运动的自由电子,从一个方向越过接触面的数目比从另一个方向过来的多,这样就使接触面两边的金属分别带正负电,并产生电位差,这个电位差称为接触电位差。假定两种金属的逸出电位(正比于逸出功)分别为 U_A 和 U_B ,且 $U_A < U_B$;自由电子密度分别为 n_A 和 n_B ,且 $n_A > n_B$,则接触电位差的数值为

$$U_{AB} = U_B - U_A + \frac{kT}{e} \ln \frac{n_A}{n_B} \quad (1-1)$$

式中 k ——玻耳兹曼常数;
 e ——电子电荷的绝对值;
 T ——接触面的绝对温度。

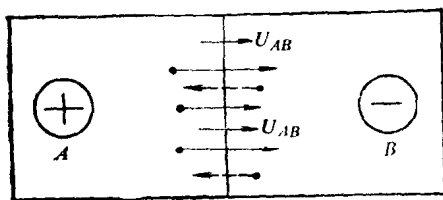


图 1-1 两种金属接触时,由于互相越过接触面的电子数不同而形成接触电位差 U_{AB}

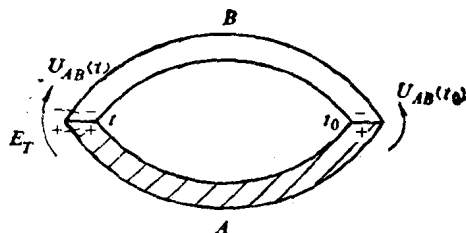


图 1-2 两种金属的闭合回路可以形成温差电势

若金属 A 和 B 的另一端也互相接触形成闭合回路, 且两个接触面的温度分别为 T 和 T_0 (或以 t 与 t_0 表示, 见图 1-2), 那么, 以 E_T 表示闭合回路内的总电势, 应有

$$\begin{aligned} E_T &= U_{AB}(T) - U_{AB}(T_0) \\ &= U_B - U_A + \frac{kT}{e} \ln \frac{n_A}{n_B} - U_B + U_A - \frac{kT_0}{e} \ln \frac{n_A}{n_B} \\ &= \frac{kT}{e} \ln \frac{n_A}{n_B} - \frac{kT_0}{e} \ln \frac{n_A}{n_B} = f(T) - f(T_0) \end{aligned} \quad (1-2)$$

由于 T 与 t 之间只差一个常数 273.15, 故式(1-2)可改写为

$$E_t = f(t) - f(t_0) \quad (1-3)$$

显然, 只有当 $t \neq t_0$ 时, E_t 才不为零, 故总电势 E_t 就是发生在两种金属接触面间的温差电势, 简称温差电势。

式(1-2)及式(1-3)表明: 温差电势 E_t 与两接触面的温差 $(t - t_0)$ 和两金属的自由电子密度之比 n_A/n_B 有关, 而与接触面大小及体积无关[⊖]。

若保持某一接触端温度 t_0 不变 (例如 $t_0 = 0^\circ\text{C}$), 则热电势 E_t 仅为另一端温度 t 的函数:

$$E_t = f(t) + C \quad (1-4)$$

式中 C ——常数。

通过测定温差电势 E_t , 便可决定温度 t , 这就是热电偶的工作原理。

式(1-3)中 E_t 和 t 的关系在高温段近似正比关系, 在低温段则偏离正比关系较远, 其重要原因是由于比值 n_A/n_B 也会随温度上升而发生变化。不过在这种情况下, E_t 仍然是 t 的单值函数关系。

将两种化学成分不同的金属导线的任意一端焊接在一起, 就构成一支热电偶。这两根导线称为热电极, 焊接的一端称为热端 (又称工作端), 另一端称为冷端 (又称自由端)。使用时, 将热端置于待测的温度场 (或介质) 中, 为了测出热电势, 冷端接入仪表 G 并使其温度恒定 (例如 0°C), 如图 1-3 所示。根据热电偶工作原理, 热电偶所产生的热电势 E_t 只与热端温度成一定关系, 而与热电极的直径、长度和焊接面积无关。故测得 E_t 即可根据相应的热电偶分度表 (或分度曲线) 求得热端的温度 t 。所谓热电偶的分度表 (或分度曲线), 就是将标准热电偶的冷

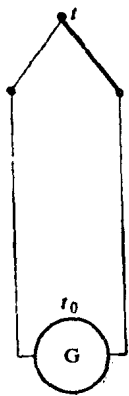


图 1-3 热电偶接入仪表以测定热电势

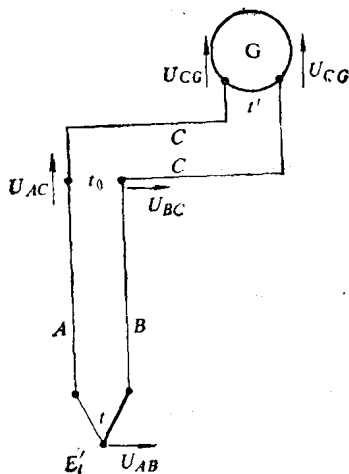


图 1-4 带有测量仪表的热电偶电路

⊖ 为说明简单起见, 这里未考虑汤姆逊效应对温差电势的影响, 下同。

端温度恒定为 0°C ，测定其热电势与热端温度的对应关系并制成的表格(或曲线)。几种常用的热电偶分度表见本书附录 II。

使用热电偶时,为了测定热电势 E_t , 不仅需要将冷端分开接入测量仪表,而且为了测量的方便,还可能接入第三种导线,如图 1-4。图中, A 、 B 是热电偶的两个电极, C 是连接热电偶与仪表的导线。可以证明,只要导线 C 与热电偶冷端两个接点处的温度 t_0 不变,则导线与仪表的接入并不影响热电偶产生的热电势(尽管导线与仪表接点处的温度变为 t')。设仪表读出的电势为 E'_T , 仿照式(1-1)及式(1-2), 闭合回路中的总电势应为:

$$\begin{aligned} E'_T &= U_{AB}(T) + U_{BC}(T_0) + U_{CG}(T') - U_{CG}(T') - U_{AC}(T_0) \\ &= U_B - U_A + \frac{kT}{e} \ln \frac{n_A}{n_B} + U_C - U_B + \frac{kT_0}{e} \ln \frac{n_B}{n_C} \\ &\quad + U_G - U_C + \frac{kT'}{e} \ln \frac{n_C}{n_G} - \left(U_G - U_C + \frac{kT'}{e} \ln \frac{n_C}{n_G} \right) \\ &\quad - \left(U_C - U_A + \frac{kT_0}{e} \ln \frac{n_A}{n_C} \right) \\ &= \frac{kT}{e} \ln \frac{n_A}{n_B} - \frac{kT_0}{e} \ln \frac{n_A}{n_B} = f(T) - f(T_0) \end{aligned}$$

表 1-1 工业用热电偶的基本特性

热 电 偶 名 称	型 号	分度号	热 电 极 材 料		温 度 测 量 范 围 ($^{\circ}\text{C}$)		误 差	主 要 优 缺 点
			极性	化学成分	长期使用	短期使用		
铂铑-铂	WRLB	LB-3	+	铂 90% 铑 10% 铂 100%	0~1300	0~1600	$\pm 0.5\%$	使用温度范围广,性能稳定,精度高,热电势较大,宜在氧化、中性气氛中使用;价格贵,不宜在还原气氛中使用
镍铬-镍硅 (镍铬-镍铝)	WREU	EU-2	+	铬 10% 镍 90% 硅 3% 镍 97%	0~900	0~1100	$\pm 0.75\%$	热电势大,精度较高,价格便宜,宜在中性及氧化气氛中使用,但均匀性差,线质较硬
镍铬-考铜	WREA	EA-2	+	镍 90% 铬 10% 镍 44% 铜 56%	0~600	0~800	$\pm 1\%$	电势更大,灵敏度高,价格便宜,宜在还原性气氛中使用,但均匀性差,易氧化
铁-康铜	WRTA	TA-2	+	铁 100% 镍 40% 铜 60%	0~600	0~800	$\pm 0.75\%$	热电势大,灵敏度高,宜在还原性气氛中使用,价格便宜,但易氧化
铂铑 30- 铂铑 6	WRLL	LL-2	+	铂 70% 铑 30% 铂 94% 铑 6%	0~1600	0~1800	$\pm 0.5\%$	使用温度高,范围广,性能稳定,精度高,宜在氧化、中性气氛中使用,自由端工作在 40° 以下时不需修正测量误差,价格贵,热电势小,不宜在还原性气氛中使用

或

$$E'_t = f(t) - f(t_0)$$

这与式(1-2)及式(1-3)完全相同, 即 $E'_t = E'_t = E_t$, 仪表读得电势值就是热电偶的热电势。

热电偶的这一特性还告诉我们, 热电偶的热端或冷端无论采用什么方法连接(焊接或其他方法), 无论接点大小如何, 只要接点处温度不变, 就不会对热电势产生任何影响。

二、常用热电偶的结构及特性

从理论上讲, 任何两种化学成分不同的金属导线都可以构成热电偶, 但普遍应用于工业生产中的热电偶只有几种类型。各种热电偶具有各自的优缺点, 实际生产中应根据测温范围、测温环境、经济价值等方面综合考虑, 加以合理选用。我国已定型的五种热电偶的基本特性见表1-1。

工业用普通热电偶的具体结构见图1-5, 它由热电极、绝缘管、保护管及接线盒四部分组成。

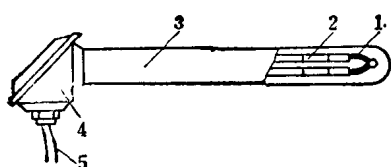


图1-5 热电偶的结构

1—热电极 2—绝缘管 3—保护管
4—接线盒 5—补偿导线

(1) 热电极。贵金属热电偶的热电极直径一般为 $0.35 \sim 0.65 \text{ mm}$, 普通金属热电偶的热电极直径一般为 $0.5 \sim 3.2 \text{ mm}$ 。热电极的长度由安装条件(其中特别是热端插入测温场所的深度)而定, 一般在 $250 \sim 3000 \text{ mm}$ 之间。

(2) 绝缘管(或称绝缘子)。它是防止两根热电极之间短路用的。其截面形状有圆形、椭圆形以及单孔、双孔和四孔之分。材料多为高铝陶瓷。

(3) 保护管。它的作用是防止热电偶腐蚀, 避免火焰及气流的直接冲击以及提高热电偶的强度。保护管的材料及使用温度见表1-2。

表1-2 常用热电偶保护管的材料、性能及用途

材料名称	长期使用温度 (°C)	短期使用温度 (°C)	性能及用途
铜及铜合金	300		为防止氧化, 使用时在表面镀一层铬
无缝钢管	600		导热性好, 用来保护镍铬-考铜热电偶、渗铝、镀铬、镀镍后可在 $900 \sim 1000^\circ\text{C}$ 下应用
不锈钢管	$900 \sim 1000$	1250	常用来做镍铬-镍铝、镍铬-考铜热电偶的保护管
石英管	1300	1600	耐温度急变性好, 能在氧化气氛中工作, 高温下在还原气氛(如氢气)中易渗透, 怕碱, 怕腐蚀, 常用作铂铑-铂的保护管
瓷管	1400	1600	耐温度急变性差, 导热系数小, 在氧化气氛中工作较好, 在还原气氛中易渗透, 怕盐、碱腐蚀, 常用作铂铑-铂、镍铬-镍硅热电偶的保护管

(4) 接线盒。它是供热电偶和补偿导线连接用的, 它的出线孔和盖子都用垫片和垫圈加以密封, 以防污物落入而影响接线的可靠性。热电极与补偿导线连接处均有正负极性标志, 便于检查和接线。

另有一种“铠装热电偶”(又称为缆式热电偶), 它是将热电偶丝与电熔氧化镁(绝缘物)熔铸在一起, 外表再套以不锈钢管, 然后一起进行拉制, 它的截面结构如图1-6所示。

铠装热电偶保护管材料有铜、不锈钢(1Cr18Ni9Ti)、GH-39等,热偶丝直径有 $\phi 1$ 、 $\phi 2$ 、 $\phi 3$ 、 $\phi 4$ 、 $\phi 6$ 等几种,长度从0.5m到20m。这种热电偶具有能任意弯曲、耐高压、反应时间快和牢固耐用等特殊优点。

三、热电偶冷端温度的影响及修正

1. 冷端温度的影响。热电偶的分度表是在其冷端温度 $t_0=0^\circ\text{C}$ 时测定的,但在实际使用时,由于环境温度的影响等原因,热电偶冷端温度不可能恒为 0°C ,此时测得的热电势,就不能直接用分度表或分度曲线去查被测温度值了。

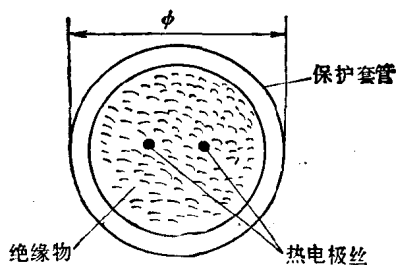


图 1-6 铠装热电偶横断面示意图

假定热电偶热端温度为 t ,冷端温度为 t_0 (等于 0°C),根据式(1-3),热电偶产生的热电势为

$$E_t(t, t_0) = f(t) - f(t_0) = f(t) + C$$

若实际的冷端温度为 t'_0 (不等于 0°C),这时热电偶的热电势变为

$$E_t(t, t'_0) = f(t) - f(t'_0)$$

两式相减得

$$E_t(t, t_0) - E_t(t, t'_0) = f(t'_0) + C = E_t(t'_0, t_0) \quad (1-5)$$

这说明当热电偶的冷端温度由 $t_0=0^\circ\text{C}$ 变为 $t'_0 \neq 0^\circ\text{C}$ 时,其热电势便产生一个差值 $E_t(t'_0, t_0)$,它相当于热端为 t'_0 、冷端为 t_0 (等于 0°C)时产生的热电势。因此,热电偶冷端温度的变化会引起测量误差,使用时必须注意修正。

2. 热电偶冷端温度的修正方法

(1) 计算电势修正法

将式(1-5)移项,得

$$E_t(t, t_0) = E_t(t, t'_0) + E_t(t'_0, t_0)$$

显然,当热电偶单独使用、通过测量热电势而测定温度时,只要测得 t'_0 (可在紧靠热电偶冷端置一水银温度计测得),即可从分度表中查得 $E_t(t'_0, t_0)$ 之值;然后与仪表(例如直流电位差计)测得的电势值 $E_t(t, t'_0)$ 相加,得出修正后的热电势;最后根据修正后的热电势之值,从分度表中查得热电偶热端的相应温度值。

例如,用一支 WREU 镍铬-镍硅热电偶(分度号为 EU-2)测量炉温,工作时的冷端温度 $t'_0=30^\circ\text{C}$,用直流电位差计测得热电势 $E_t(t, t'_0)=34.12\text{ mV}$,求热电偶热端温度是多少?

由 EU-2 分度表查得

$$E_t(t'_0, t_0) = E_t(30, 0) = 1.20\text{ mV}$$

已测得

$$E_t(t, t'_0) = 34.12\text{ mV}$$

故

$$E_t(t, t_0) = E_t(t, t'_0) + E_t(t'_0, t_0) = 34.12\text{ mV} + 1.20\text{ mV} = 35.32\text{ mV}$$

从 EU-2 分度表中可查出与 35.32 mV 相对应的热端温度(炉温)是 850°C 。

(2) 调节仪表机械零点修正法

当热电偶和二次仪表成套使用时,对于按温度刻度、具有机械零点调节器的二次仪表(如动圈式仪表),若热电偶工作时冷端温度能够保持恒定,测量精度要求不太高时,就可以把仪表的指示针从刻度起点 t_0 预先调节到已知的冷端温度 t'_0 上,如图 1-7 中的 a 点调到 b 点。这种方法是把补正值直接加到仪表上,可以认为仪表指示值就是热电偶的热端温度值。注意,调节

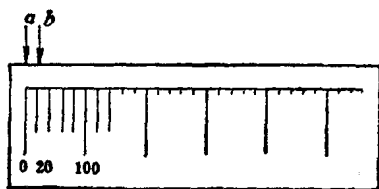


图 1-7 调整仪表机械零点

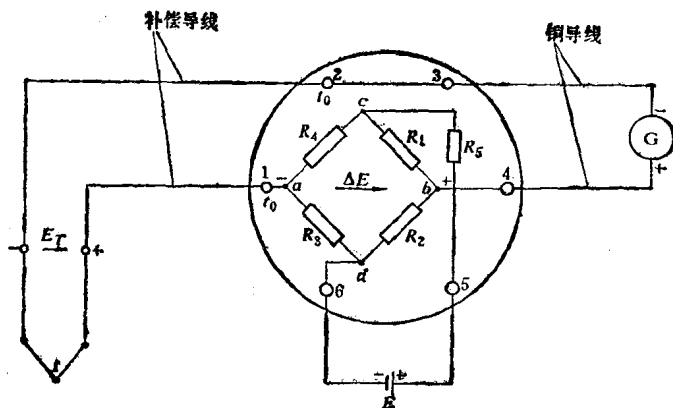


图 1-8 带有冷端温度补偿器的测温线路示意图

动圈式仪表的机械零点位置时,应在热电偶输入端子短路的情况下进行。

(3) 热电偶与二次仪表间连接冷端补偿器(补偿电桥)

冷端补偿器能自动补偿由于热电偶冷端温度变化而产生的测量误差,凡是内部没有冷端温度补偿电路的二次仪表(如动圈式仪表或直流电位计)均可与之配合使用,带有冷端补偿器的测温线路如图 1-8 所示。

热电偶通过补偿导线(见后面的专题介绍)使其冷端移到电桥的一个臂 R_4 ,且两者处于同一温度,电阻 R_1 、 R_2 、 R_3 和 R_5 (均为锰铜丝绕制)的电阻温度系数很小而 R_4 的则比较大(铜丝绕制)。当热电偶冷端温度(电桥温度)处于仪表起始刻度(0°C)时,电桥处于平衡状态, a 、 b 两点电位相等,此时补偿电桥对仪表的读数毫无影响;当热电偶冷端温度变化时,电阻 R_4 的阻值也随之相应地变化,电桥失去平衡, a 、 b 两点间出现电位差 ΔE ,由于桥路参数设计成在一定温度变化范围内, ΔE 总是与热电偶冷端温度变化应该补正的电势 $E_t(t_0, t_0)$ 方向相同、大小相等的,二次仪表测得的电势值便是热电偶温差电势 $E_t(t, t_0)$ 与 $E_t(t_0, t_0)$ 之和,从而起到自动补偿的作用。

对于自动平衡式仪表(如电子电位差计),仪表内一般都有冷端温度补偿电路,只要冷端温度不超过补偿范围,则使用时不必再考虑热电偶冷端温度的补正问题,可直接将热电偶接入仪表。

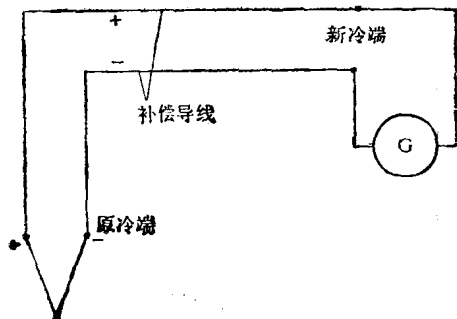


图 1-9 补偿导线的联接

四、热电偶补偿导线

热电偶和二次仪表之间必须使用补偿导线连接。所谓补偿导线,实际上也是一对化学成分不同的金属线,在 $0\sim 100^\circ\text{C}$ 范围内与其所配接的热电偶具有相同的温度-热电势关系。因此,利用补偿导线连接热电偶就相当于将热电极延长了,但它的价格却比相应的热电极便宜得多。用补偿导线将热电偶“延长”以后,可

以方便地测量热电势或安装二次仪表,同时使热电偶的冷端延长到温度较稳定的地方,以便进行上述的补正方法。

补偿导线是双芯线,有单股和多股绞合之分,其绝缘内层颜色不同,以资区别正负极。补偿导线的连接方式见图 1-9。

选用补偿导线时应注意: