

温度检测及仪表

温度是工业生产和科学实验中一个非常重要的参数。物体的许多物理现象和化学性质都与温度有关。许多生产过程都是在一定的温度范围内进行的,需要测量温度和控制温度。在石油化工生产过程中,温度是普遍存在又十分重要的参数。随着科学技术的发展,对温度的测量越来越普遍,而且对温度测量的准确度也有更高的要求。

本章介绍温度检测方法及温标,石油化工工业常用温度检测仪表,温度检测仪表的选用及安装等内容。

5.1 温度检测方法及温标

任何一个石油化工生产过程都伴随着物质的物理或化学性质的改变,都必然有能量的转化和交换,热交换是这些能量转换中最普遍的交换形式。此外,有些化学反应与温度有着直接的关系。因此,温度的测量是保证生产正常进行,确保产品质量和安全生产的关键环节。

5.1.1 温度及温度检测方法

温度是表征物体冷热程度的物理量,是物体分子运动平均动能大小的标志。

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

根据测温元件与被测物体接触与否,温度测量可以分为接触式测温和非接触式测温两大类。

1. 接触式测温

任意两个冷热程度不同的物体相接触,必然要发生热交换现象,热量将由受热程度高的物体传到受热程度低的物体,直到两物体的温度完全一致,即达到热平衡为止。接触式测温就是利用这个原理,选择合适的物体作为温度敏感元件,其某一物理性质随温度而变化的特性为已知,通过温度敏感元件与被测对象的热交换,测量相关的物理量,即可确定被测对象的温度。为了得到温度的精确测量,要求用于测温物体的物理性质必须是连续、单值地随温度变化,并且要复现性好。

以接触式方法测温的仪表主要包括基于物体受热体积膨胀性质的膨胀式温度检测仪表;具有热电效应的热电偶温度检测仪表;基于导体或半导体电阻值随温度变化的热电阻温度检测仪表。

接触式测温必须使温度计的感温部位与被测物体有良好的接触,才能得到被测物体的真实温度,实现精确的测量。一般来说,接触式测温精度高,应用广泛,简单、可靠。但由于测温元件与被测介质需要进行充分的热交换,需要一定的时间才能达到热平衡,会存在一定的测量滞后。由于测温元件与被测介质接触,有可能与被测介质发生化学反应,特别对于热容量较小的被测对象,还会因传热而破坏被测物体原有的温度场,测量上限也受到感温材料耐温性能的限制,不能用于很高温度的测量,对于运动物体测温困难较大。

2. 非接触式测温

应用物体的热辐射能量随温度的变化而变化的原理进行测温。物体辐射能量的大小与温度有关,当选择合适的接收检测装置时,便可测得被测对象发出的热辐射能量并且转换成可测量和显示的各种信号,实现温度的测量。

非接触式测温中测温元件的任何部位均不与被测介质接触,通过被测物体与感温元件之间热辐射作用实现测温,不会破坏被测对象温度场,反应速度较快,可实现遥测和运动物体的测温;测温元件不必达到与被测对象相同的温度,测量上限可以很高,测温范围广。但这种仪表由于物体发射率、测温对象到仪表的距离、烟尘和其他介质的影响,故一般来说测量误差较大。通常仅用于高温测量。

常用测温仪表分类及特性和使用范围如表 5-1 所示。

表 5-1 常用测温仪表及性能

测温方式	类别及测温原理		典型仪表	温度范围/℃	特点及应用场合
接触式测温	膨胀类	固体热膨胀 利用两种金属的热膨胀差测量	双金属温度计	-50~+600	结构简单、使用方便,但精度低,可直接测量气体、液体、蒸汽的温度
		液体热膨胀	玻璃液体温度计	水银 -30~+600 有机液体 -100~+150	结构简单、使用方便、价格便宜、测量准确,但结构脆弱易损坏,不能自动记录和远传,适用于生产过程和实验室中各种介质温度就地测量
		气体热膨胀 利用液体、气体热膨胀及物质的蒸汽压变化	压力式温度计	0~+500 液体型 0~+200 蒸汽型	机械强度高,不怕震动,输出信号可以自动记录和控制,但热惯性大,维修困难,适于测量对铜及铜合金不起腐蚀作用的各种介质的温度
	热电阻	金属热电阻 导体的温度效应	铜电阻、铂电阻	铂电阻 -200~+850 铜电阻 -50~+150 镍电阻 -60~+180	测温范围宽,物理化学性质稳定,输出信号易于远传和记录,适用于生产过程中测量各种液体、气体和蒸汽介质的温度
		半导体热敏电阻 半导体的温度效应	锗、碳、金属氧化物热敏电阻	-50~+300	变化灵敏、响应时间短、力学性能强,但复现性和互换性差,非线性严重,常用于非工业过程测温
	热电偶	金属热电偶 利用热电效应	铂铑 ₃₀ -铂铑 ₆ 、铂铑-铂、镍铬-镍硅、铜-康铜等热电偶	-200~+1800	测量精度较高,输出信号易于远传和自动记录,结构简单,使用方便,测量范围宽,但输出信号和温度示值呈非线性关系,下限灵敏度较低,需冷端温度补偿,被广泛地应用于化工、冶金、机械等部门的液体、气体、蒸汽等介质的温度测量
		难熔金属热电偶	钨铼、钨-钼、镍铬-金铁热电偶	0~+2200 -270~0	钨铼系及钨-钼系热电偶可用于超高温的测量,镍铬-金铁热电偶可用于超低温的测量,但未进行标准化,因而使用时需特别标定
非接触式测温	光纤类	利用光纤的温度特性或作为传光介质	光纤温度传感器 光纤辐射温度计	-50~+400 +200~+4000	可以接触或非接触测量,灵敏度高,电绝缘性好,体积小,重量轻,可弯曲。适用于强电磁干扰、强辐射的恶劣环境
	辐射类		辐射式高温计	+20~+2000	非接触测量,不破坏被测温度场,可实现遥测,测温范围广,应用技术复杂
		利用普朗克定律	光电高温计 比色温度计	+800~+3200 +500~+3200	

5.1.2 温标

为了保证温度量值的统一和准确而建立的衡量温度的标尺,称为温标。温标即为温度的数值表示法,它定量地描述温度的高低,规定了温度的读数起点(零点)和基本单位。

各种温度计的刻度数值均由温标确定,常用的温标有如下几种。

1. 经验温标

借助于某种物质的物理量与温度变化的关系,用实验方法或经验公式所确定的温标,称为经验温标。它主要指摄氏温标和华氏温标,这两种温标都是根据液体(水银)受热后体积膨胀的性质建立起来的。

1) 摄氏温标

摄氏温标是 1742 年,瑞典天文学家安德斯·摄尔修斯(Anders Celsius, 1701—1744 年)建立的。

规定标准大气压下,纯水的冰点为 0°C ,沸点为 100°C ,两者之间分成 100 等份,每一份为 1 摄氏度,用 t 表示,符号为 $^{\circ}\text{C}$ 。它是我国目前工业测量上通用的温度标尺。

2) 华氏温标

华氏温标是 1714 年,德国物理学家丹尼尔·家百列·华兰海特(Daniel Gabriel Fahrenheit, 1686—1736 年)建立的。

规定标准大气压下,纯水的冰点为 32°F ,沸点为 212°F ,两者之间分成 180 等份,每一份为 1°F ,符号为 $^{\circ}\text{F}$ 。目前,只有美国、英国等少数国家仍保留华氏温标为法定计量单位。

由摄氏和华氏温标的定义,可得摄氏温度与华氏温度的关系为

$$t_{\text{F}} = 32 + \frac{9}{5}t \quad (5-1)$$

或

$$t = \frac{5}{9}(t_{\text{F}} - 32) \quad (5-2)$$

式中: t_{F} 为华氏度。

不难看出,摄氏温度为 0°C 时,华氏温度为 32°F ,摄氏温度为 100°C 时,华氏温度为 212°F 。可见,不同温标所确定的温度数值是不同的。由于上述经验温标都是根据液体(如水银)在玻璃管内受热后体积膨胀这一性质建立起来的,其温度数值会依附于所用测温物质的性质,如水银的纯度和玻璃管材质,因而不能保证世界各国测量值的一致性。

2. 热力学温标

1848 年,英国的开尔文(L. Kelvin)根据卡诺热机建立了与测温介质无关的新温标,称为热力学温标,又称开尔文温标。

开尔文温标的单位为开尔文,符号为 K,用 T 表示。规定水的三相点温度为 273.16K , 1 开尔文为 $1/273.16$ 。有一个绝对 0K ,低于 0K 的温度不可能存在。

它是以热力学第二定律为基础的一种理论温标,其特点是不与某一特定的温度计相联系,并与测温物质的性质无关,是由卡诺定理推导出来的,是最理想的温标。但由于卡诺循环是无法实现的,所以热力学温标是一种理想的纯理论温标,无法真正实现。

3. 国际实用温标

国际实用温标又称为国际温标,是一个国际协议性温标。它是一种既符合热力学温标

又使用方便、容易实现的温标。它选择了一些纯物质的平衡态温度(可复现)作为基准点,规定了不同温度范围内的标准仪器,建立了标准仪器的示值与国际温标关系的标准内插公式,应用这些公式可以求出任何两个相邻基准点温度之间的温度值。

第一个国际实用温标自1927年开始采用,记为ITS—27。1948年、1968年和1990年进行了几次较大修改。随着科学技术的发展,国际实用温标也在不断地进行改进和修订,使之更符合热力学温标,有更好的复现性和能够更方便地使用。目前国际实用温标定义为1990年的国际温标ITS—90。

4. ITS—90 国际温标

ITS—90 国际温标中规定,热力学温度用 T_{90} 表示,单位为开尔文,符号为 K。它规定水的三相点热力学温度为 273.16K,1K 为 1/273.16。同时使用的国际摄氏温度用 t_{90} 表示,单位是摄氏度,符号为 $^{\circ}\text{C}$ 。每一个摄氏度和每一个开尔文量值相同,它们之间的关系为

$$t_{90} = T_{90} - 273.15 \quad (5-3)$$

实际应用中,一般直接用 T 和 t 代替 T_{90} 和 t_{90} 。

5. 温标的传递

为了保证温标复现的精确性和把温度的正确数值传递到实际使用的测量仪表,国际实用温标由各国计量部门按规定分别保持和传递。由定义固定点及一整套标准仪表复现温度标准,再通过基准和标准测温仪表逐级传递,其传递关系如下:

定义基准点 → 基准仪器 → 一等标准温度计 → 二等标准温度计 → 实验室仪表 → 工业现场仪表

各类温度计在使用前均要按传递系统的要求进行检定。一般实用工作温度计的检定装置采用各种恒温槽和管式电炉,用比较法进行检定。比较法是将标准温度计和被校温度计同时放入检定装置中,以标准温度计测定的温度为已知,将被校温度计的测量值与其比较,从而确定被校温度计的精度。

5.2 常用温度检测仪表

石油化工生产过程中的温度检测一般都采用接触式测温。常用的仪表有膨胀式温度计、热电偶温度计、热电阻温度计等,又以后两者最为常用,下面分别加以介绍。

5.2.1 膨胀式温度计

基于物体受热体积膨胀的性质而制成的温度计称为膨胀式温度计。

膨胀式温度计分为液体膨胀、气体膨胀和固体膨胀三大类,下面分别介绍其中常用的三种温度计。

1. 玻璃液体温度计

玻璃液体温度计是应用最广泛的一种温度计。其结构简单,使用方便、精度高、价格低廉。

1) 测温原理

图 5-1 所示为典型的玻璃液体温度计,是利用液体受热后体积随温度膨胀的原理制成的。玻璃温包插入被测介质中,被测介质的温度升高或降低,使感温液体膨胀或收缩,进而沿毛细管上升或下降,由刻度标尺显示出温度的数值。

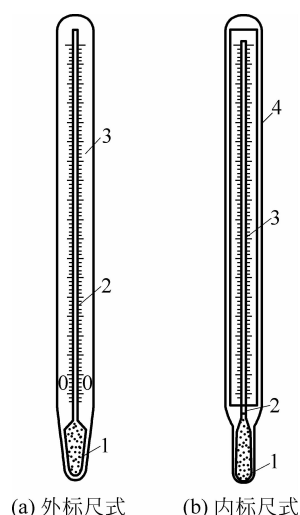


图 5-1 水银玻璃液体温度计

1—玻璃温包；2—毛细管；
3—刻度标尺；4—玻璃外壳

大多数玻璃液体温度计的液体为水银或酒精。其中水银工作液在 $-38.9 \sim 356.7^{\circ}\text{C}$ 之间呈液体状态,在此范围内,若温度升高,水银会膨胀,其膨胀率是线性的。与其他工作液相比,有不粘玻璃、不易氧化、容易提纯等优点。

2) 结构与分类

玻璃液体温度计的结构都是棒状的,按其标尺位置可分为内标尺式和外标尺式。图 5-1(a)的标尺直接刻在玻璃管的外表面上,为外标尺式。外标尺式温度计是将连通玻璃温包的毛细管固定在标尺板上,多用来测量室温。图 5-1(b)为内标尺式温度计,它有乳白色的玻璃片温度标尺,该标尺放置在连通玻璃温包的毛细管后面,将毛细管和标尺一起套在玻璃管内。这种温度计热惯性较大,但观测比较方便。

玻璃液体温度计按用途分类又可分为工业、标准和实验室用三种。标准玻璃液体温度计有内标尺式和外标尺式,分为一等和二等,其分度值为 $0.05 \sim 0.1^{\circ}\text{C}$,可作为标准温度计用于校验其他温度计。工业用温度计一般做成内标尺式,其尾部有直的、弯成 90° 角或 135° 角的,如图 5-2 所示。为了避免工业温度计在使用时被碰伤,在玻璃管外部常罩有金属保护套管,在玻璃温包与金属套管之间填有良好的导热物质,以减少温度计测温的惯性。实验室用温度计形式和标准的相仿,精度也较高。

2. 压力式温度计

压力式温度计是根据密闭容器中的液体、气体和低沸点液体的饱和蒸汽受热后体积膨胀或压力变化的原理工作的,用压力表测量此变化,故又称为压力表式温度计。按所用工作介质不同,分为液体压力式、气体压力式和蒸汽压力式温度计。

压力式温度计的结构如图 5-3 所示。它主要由充有感温介质的温包、传压元件(毛细管)和压力敏感元件(弹簧管)构成的全金属组件。温包内充填的感温介质有气体、液体或蒸发液体等。测温时将温包置于被测介质中,温包内的工作物质因温度变化而产生体积膨胀或收缩,进而导致压力变化。该压力变化经毛细管传递给弹簧管使其产生一定的形变,然后借助齿轮或杠杆等传动机构,带动指针转动,指示出相应的温度值。温包、毛细管和弹簧管这三个主要组成部分对温度计的精度影响极大。

3. 双金属温度计

双金属温度计是一种固体膨胀式温度计,它是利用两种膨胀系数不同的金属薄片来测量温度的。其结构简单,可用于气体、液体及蒸汽的温度测量。

双金属温度计中的感温元件是用两片线膨胀系数不同的金属片叠焊在一起制成的,如图 5-4(a)所示。双金属片受热后,由于两种金属片的膨胀系数不同,膨胀长度就不同,会产生弯曲变形。温度越高产生的线膨胀长度差就越大,引起弯曲的角度也就越大,即弯曲程度

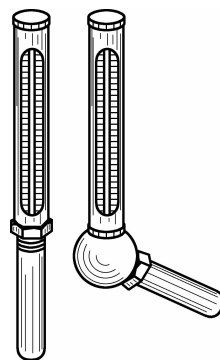


图 5-2 工业用玻璃液体温度计

与温度高低成正比。双金属温度计就是基于这一原理工作的。

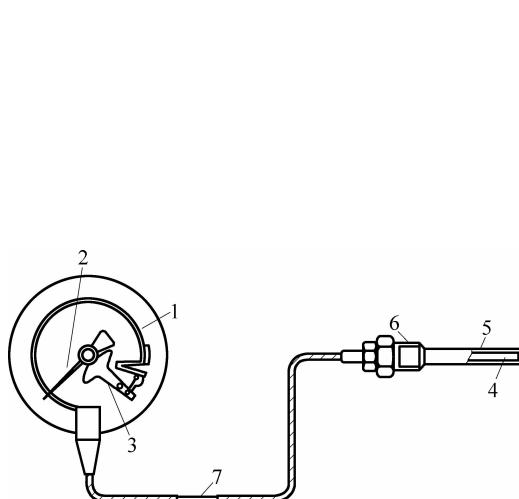


图 5-3 压力式温度计结构示意图

1—弹簧管；2—指针；3—传动机构；4—工作介质；
5—温包；6—螺纹连接件；7—毛细管

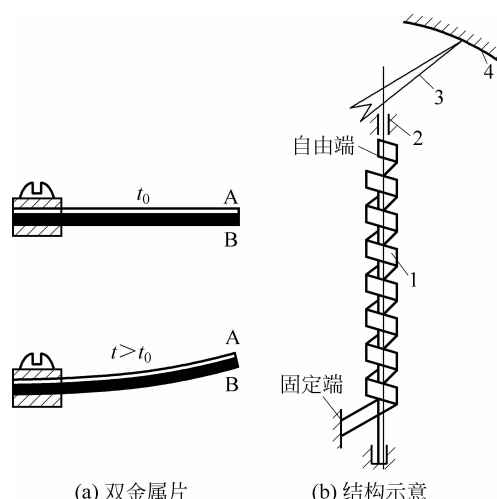


图 5-4 双金属温度计测量原理图

1—双金属片；2—指针轴；3—指针；4—刻度盘

为了提高仪表的灵敏度，工业上应用的双金属温度计是将双金属片制成螺旋形，如图 5-4(b)所示。一端固定在测量管的下部，另一端为自由端，与插入螺旋形金属片的中心轴焊接在一起。当被测温度发生变化时，双金属片自由端发生位移，使中心轴转动，经传到放大机构，由指针指示出被测温度值。

图 5-5 是一种双金属温度信号器的示意图。当温度变化时，双金属片 1 产生弯曲，且与调节螺钉相接触，使电路接通，信号灯 4 便发亮。如以继电器代替信号灯便可以用来控制热源（如电热丝）而成为两位式温度控制器。温度的控制范围可通过改变调节螺钉 2 与双金属片 1 之间的距离来调整。若以电铃代替信号灯便可以作为一种双金属温度信号报警器。

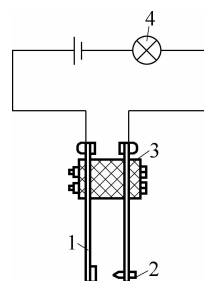


图 5-5 双金属温度信号器

1—双金属片；2—调节螺钉；
3—绝缘子；4—信号灯

双金属温度计的实际结构如图 5-6 所示。它的常用结构有两种，一种是轴向结构，其刻度盘平面与保护管成垂直方向连接；另一种是径向结构，其刻度盘平面与保护管成水平方向连接。可根据生产操作中安装条件和方便观察的要求来选择轴向与径向结构。还可以做成带有上、下限接点的电接点双金属温度计，当温度达到给定值时，可以发出电信号，实现温度的控制和报警功能。

5.2.2 热电偶温度计

热电偶温度计是将温度量转换成电势的热电式传感器。自 19 世纪发现热电效应以来，热电偶便被广泛用来测量 100~1300℃ 范围内的温度，根据需要还可以用来测量更高或更低的温度。它具有结构简单、使用方便、精度高、热惯性小，可测量局部温度和便于远距离传送、集中检测、自动记录等优点，是目前工业生产过程中应用的最多的测温仪表，在温度测量

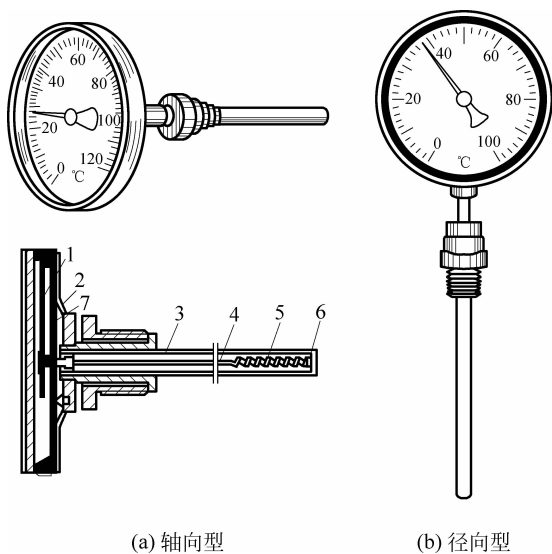


图 5-6 双金属温度计

1—指针；2—表壳；3—金属保护管；4—指针轴；5—双金属感温元件；6—固定轴；7—刻度盘

中占有重要的地位。

热电偶温度计由三部分组成：热电偶(感温元件)；测量仪表(毫伏计或电位差计)，连接热电偶和测量仪表的导线(补偿导线及铜导线)。图 5-7 是热电偶温度计最简单测温系统的示意图。

1. 热电偶测温原理

热电偶的基本工作原理是基于热电效应。

1821 年,德国物理学家赛贝克(T. J. Seebeck)用两种不同的金属组成闭合回路,并用酒精灯加热其中一个接触点,发现在回路中的指南针发生偏转,如图 5-8 所示。如果用两盏酒精灯对两个接触点同时加热,指南针的偏转角度反而减小。显然,指南针的偏转说明了回路中有电动势产生并有电流流动,电流的强弱与两个接点的温度有关。据此,赛贝克发现并证明了热电效应,或称热电现象。

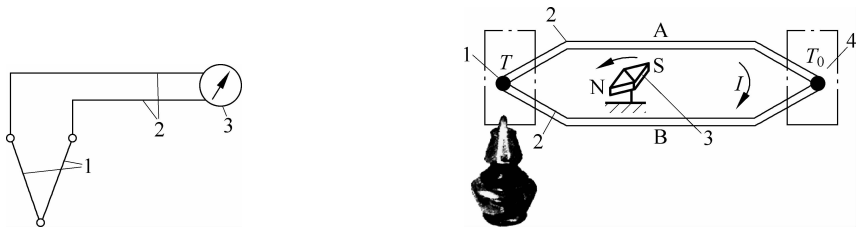


图 5-7 热电偶温度计测温系统

1—热电偶；2—导线；3—显示仪表

图 5-8 热电偶原理示意图

1—工作端；2—热电极；3—指南针；4—参考端

将两种不同的导体或半导体(A,B)连接在一起构成一个闭合回路,当两接点处温度不同时 ($T > T_0$),回路中将产生电动势,这种现象称为热电效应,亦称赛贝克效应,所产生的电动势称为热电势或赛贝克电势。两种不同材料的导体或半导体所组成的回路称为“热电

偶”,组成热电偶的导体或半导体称为“热电极”。置于温度为 T 的被测介质中的接点称为测量端,又称工作端或热端。置于参考温度为 T_0 的温度相对固定处的另一接点称为参考端,又称固定端、自由端或冷端。

研究发现,热电偶回路产生的热电势 $E_{AB}(T, T_0)$ 由两部分构成,一是两种不同导体间的接触电势,又称帕尔贴(Peltier)电势;二是单一导体两端温度不同的温差电势,又称汤姆逊(Thomson)电势。

1) 接触电势——帕尔贴效应

两种不同导体接触时产生的电势。

当自由电子密度不同的 A、B 两种导体接触时,在两导体接触处会产生自由电子的扩散现象,自由电子由密度大的导体 A 向密度小的导体 B 扩散。在接触处失去电子的一侧(导体 A)带正电,得到电子的一侧(导体 B)带负电,从而在接点处形成一个电场,如图 5-9(a)所示。该电场将使电子反向转移,当电场作用和扩散作用动态平衡时,A、B 两种不同导体的接点处就形成稳定的接触电势,如图 5-9(b)所示,接触电势的数值取决于两种不同导体的性质和接触点的温度。

2) 温差电势——汤姆逊效应

在同一导体中,由于两端温度不同而产生的电势。

同一导体的两端温度不同时,高温端的电子能量要比低温端的电子能量大,导体内自由电子从高温端向低温端扩散,并在低温端积聚起来,使导体内建立起一电场。当此电场对电子的作用力与扩散力平衡时,扩散作用停止。结果高温端因失去电子而带正电,低温端因获得多余的电子而带负电,因此,在导体两端便形成温差电势,亦称汤姆逊电势,此现象称为汤姆逊效应,如图 5-9(c)所示。

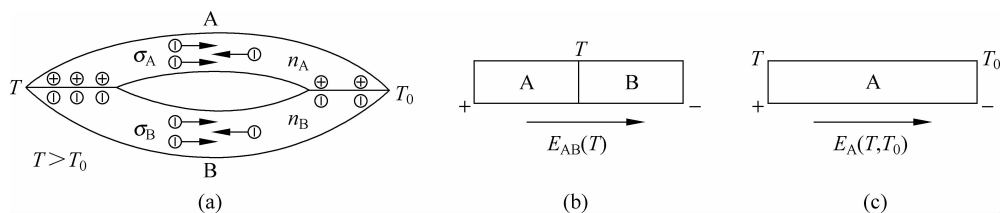


图 5-9 热电效应示意图

3) 热电偶回路的总热电势

在两种金属 A、B 组成的热电偶回路中,两接点的温度为 T 和 T_0 ,且 $T > T_0$ 。则回路总电动势由四个部分构成,两个温差电动势,即 $E_A(T, T_0)$ 和 $E_B(T, T_0)$,两个接触电动势,即 $E_{AB}(T)$ 和 $E_{AB}(T_0)$,它们的大小和方向如图 5-10 所示。按逆时针方向写出总的回路电动势为

$$\begin{aligned} E_{AB}(T, T_0) &= E_{AB}(T) + E_B(T, T_0) - E_{AB}(T_0) - E_A(T, T_0) \\ &= f(T) - f(T_0) \end{aligned} \quad (5-4)$$

令

$$e_{AB}(T) = f(T); \quad e_{AB}(T_0) = f(T_0)$$

则有

$$E_{AB}(T, T_0) = e_{AB}(T) - e_{AB}(T_0) \tag{5-5}$$

因此,热电偶回路的总电动势为 $e_{AB}(T)$ 和 $e_{AB}(T_0)$ 两个分电动势的代数和。

由上述的推导结果可知,总电动势由与 T 有关和与 T_0 有关的两部分组成,它由电极材料和接点温度而定。

当材质选定后,将 T_0 固定,即

$$e_{AB}(T_0) = C(\text{常数})$$

则

$$E_{AB}(T, T_0) = e_{AB}(T) - C = \Phi(T) \tag{5-6}$$

它只与 $e_{AB}(T)$ 有关,A、B 选定后,回路总电动势就只是温度 T 的单值函数,只要测得 $e_{AB}(T)$,即可得到温度,这就是热电偶测温的基本原理。

4) 热电偶工作的基本条件

从上面的分析可知热电偶工作的两个基本条件:

(1) 如果组成热电偶的两电极材料相同,两接点温度不同,热电偶回路不会产生热电势,即回路电动势为零。

(2) 如果组成热电偶的两电极材料不同,但两接点温度相同,即 $T = T_0$,热电偶回路也不会产生热电势,即回路电动势也为零。

简而言之,热电偶回路产生热电势的基本条件是:两电极材料不同,两接点温度不同。

2. 热电偶应用定则

热电偶的应用定则主要包括均质导体定则、中间导体定则和中间温度定则。

1) 均质导体定则

两种均质导体构成的热电偶,其热电势大小与热电极材料的几何形状、直径、长度及沿热电极长度上的温度分布无关,只与电极材料和两端温度差有关。

如果热电极材质不均匀,则当热电极上各处温度不同时,将产生附加电势,造成无法估计的测量误差。因此,热电极材料的均匀性是衡量热电偶质量的重要指标之一。

2) 中间导体定则

利用热电偶进行测温,必须在回路中引入连接导线和仪表,如图 5-11 所示。这样就在热电偶回路中加入了第三种导体,而第三种导体的引入又构成了新的接点,如图 5-11(a)中的点 2 和 3,图 5-11(b)中的点 3 和 4。接入导线和仪表后会不会影响回路中的热电势呢?下面分别对以上两种情况进行分析。

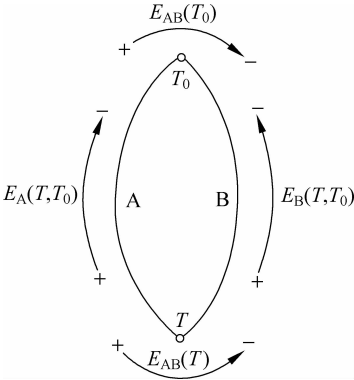


图 5-10 热电偶回路的总热电势示意图

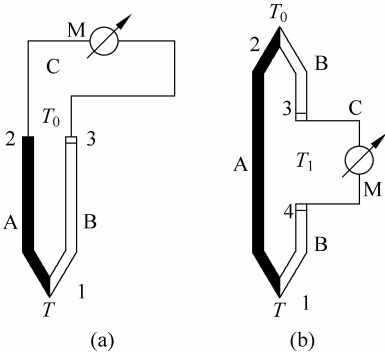


图 5-11 有中间导体的热电偶回路

在图 5-11(a)所示情况下(暂不考虑显示仪表),热电偶回路的总热电势为

$$E_1 = e_{AB}(T) + e_{BC}(T_0) + e_{CA}(T_0) \quad (5-7)$$

设各接点温度相同,都为 T_0 ,则闭合回路总电动势应为 0,即

$$e_{AB}(T_0) + e_{BC}(T_0) + e_{CA}(T_0) = 0$$

有

$$e_{BC}(T_0) + e_{CA}(T_0) = -e_{AB}(T_0)$$

可以得到

$$E_1 = e_{AB}(T) - e_{AB}(T_0) \quad (5-8)$$

式 5-8 与式 5-5 相同,即 $E_1 = E_{AB}(T, T_0)$ 。

在图 5-11(b)所示情况下(暂不考虑显示仪表),3、4 接点温度相同,均为 T_1 ,则热电偶回路的总热电势为

$$E_2 = e_{AB}(T) + e_{BC}(T_1) + e_{CB}(T_1) + e_{BA}(T_0) \quad (5-9)$$

因为

$$e_{BC}(T_1) = -e_{CB}(T_1)$$

$$e_{BA}(T_0) = -e_{AB}(T_0)$$

可以得到

$$E_2 = e_{AB}(T) - e_{AB}(T_0) \quad (5-10)$$

式 5-10 也和式 5-5 相同,即 $E_2 = E_{AB}(T, T_0)$ 。可见,总的热电势在中间导体两端温度相同的情况下,与没有接入时一样。

由此可得出结论:

在热电偶测温回路中接入中间导体,只要中间导体两端温度相同,则它的接入对回路的总热电势值没有影响。即回路中总的热电势与引入第三种导体无关,这就是中间导体定则。

根据这一定则,如果需要在回路中引入多种导体,只要保证引入的导体两端温度相同,均不会影响热电偶回路中的电动势,这是热电偶测量中一个非常重要的定则。有了这一定则,就可以在回路中方便地连接各种导线及仪表。

3) 中间温度定则

在热电偶测温回路中,常会遇到热电极的中间连接问题,如图 5-12 所示。如果热电极 A、B 分别与连接导体 A'、B' 相接,其接点温度分别为 T 、 T_C 和 T_0 ,则回路的总电动势等于热电偶的热电势 $E_{AB}(T, T_C)$ 与连接导体的热电势 $E_{A'B'}(T_C, T_0)$ 的代数和,即

$$E_{AB}(T, T_0) = E_{AB}(T, T_C) + E_{A'B'}(T_C, T_0) \quad (5-11)$$

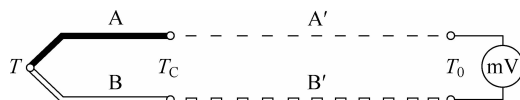


图 5-12 采用连接导体的热电偶回路

当导体 A、B 与 A'、B' 在较低温度(100°C 或 200°C)下的热电特性相近时,即它们在相同温差下产生的热电势值近似相等,则回路的总电动势为

$$E_{AB}(T, T_0) = E_{AB}(T, T_C) + E_{AB}(T_C, T_0) \quad (5-12)$$

式 5-12 即为中间温度定则, T_C 为中间温度。即

热电偶 A、B 在接点温度为 T, T_0 时的电动势 $E_{AB}(T, T_0)$, 等于热电偶 A、B 在接点温度为 T, T_C 和 T_C, T_0 时的电动势 $E_{AB}(T, T_C)$ 和 $E_{AB}(T_C, T_0)$ 的代数和。

中间温度定则为工业测温中使用补偿导线提供了理论基础。只要选配在低温下与热电偶热电特性相近的补偿导线, 便可使热电偶的参比端延长, 使之远离热源到达一个温度相对稳定的地方, 而不会影响测温的准确性。

从这一结论还可以看出, 在使用热电偶测温时, 如果热电偶各部分所受到的温度不同, 则热电偶所产生的热电势只与工作端和参考端温度有关, 其他部分温度变化(中间温度变化)并不影响回路热电势的大小。

另外, 在热电偶热电势的计算中要使用分度表。热电偶的分度表表达的是在参比端温度为 0°C 时, 热端温度与热电势之间的对应关系, 以表格的形式表示出来。若设参比端温度为 $T_C, T_0=0$, 则

$$E_{AB}(T, 0) = E_{AB}(T, T_C) + E_{AB}(T_C, 0) \quad (5-13)$$

根据式 5-13 就可以进行热电势的计算, 进而求出被测温度。在实际热电偶测温回路中, 利用热电偶的这一性质, 可对参考端温度不为 0°C 的热电势进行修正。

3. 常用工业热电偶及其分度表

根据热电偶测温原理可知, 两种不同的导体或半导体都可以组成热电偶, 且每一种热电偶的热电特性是不同的, 即对应相同的温度所产生的电势值是不同的。那么在工业应用中的情况又如何呢?

1) 热电极材料的基本要求

理论上任意两种金属材料都可以组成热电偶, 但实际情况并非如此。为保证在工程技术中应用的可靠性, 并且有足够的准确度, 并非所有材料都适合做热电偶, 必须进行严格地选择。热电极材料应满足下列要求:

- (1) 在测温范围内热电特性稳定, 不随时间和被测对象变化;
- (2) 在测温范围内物理、化学性质稳定, 不易被氧化、腐蚀, 耐辐射;
- (3) 温度每增加 1°C 所产生的热电势要大, 即热电势随温度的变化率足够大, 灵敏度高;
- (4) 热电特性接近单值线性或近似线性, 测温范围宽;
- (5) 电导率高, 电阻温度系数小;
- (6) 机械性能好, 机械强度高, 材质均匀; 工艺性好, 易加工, 复制性好; 制造工艺简单; 价格便宜。

热电偶的品种很多, 各种分类方法也不尽相同。按照工业标准化的要求, 可分为标准化热电偶和非标准化热电偶两大类。

2) 标准化热电偶

(1) 标准化热电偶分类。

标准化热电偶是指工业上比较成熟、能批量生产、性能稳定、应用广泛、具有统一分度表并已列入国际标准和国家标准文件中的热电偶。同一型号的标准化热电偶具有良好的互换性, 精度有一定的保证, 并有配套的显示、记录仪表可供选用, 为应用提供了方便。

目前国际电工委员会向世界各国推荐了 8 种标准化热电偶。在执行了国际温标 ITS—90 后, 我国目前完全采用国际标准, 还规定了具体热电偶的材质成分。不同材质构成的热电偶用不同的型号, 即分度号来表示。表 5-2 列出了 8 种标准化热电偶的名称、性能及主要

特点。其中所列各种型号热电偶的电极材料中,前者为热电偶的正极,后者为负极。

表 5-2 标准化热电偶特性表

名 称	分度号	E(100,0)	测量范围/℃		适用气氛	主 要 特 点
			长期使用	短期使用		
铂铑 ₃₀ —铂铑 ₆	B	0.033mV	0~1600	1800	O、N	测温上限高,稳定性好,精度高;热电势值小;线性较差;价格高;适于高温测量
铂铑 ₁₃ —铂	R	0.647mV	0~1300	1600	O、N	测温上限较高,稳定性好,精度高;热电势值较小;线性差;价格高;多用于精密测量
铂铑 ₁₀ —铂	S	0.646mV	0~1300	1600	O、N	性能几乎与 R 型相同,只是热电势还要小一些
镍铬—镍硅(铝)	K	4.096mV	-200~1200	1300	O、N	热电势值大,线性好,稳定性好,价格较便宜;广泛应用于中高温工业测量中
镍铬硅—镍硅	N	2.774mV	-200~1200	1300	O、N、R	是一种较新型热电偶,各项性能均比 K 型的好,适于工业测量
镍铬—康铜	E	6.319mV	-200~760	850	O、N	热电势值最大,中低温稳定性好,价格便宜;广泛应用于中低温工业测量中
铁—康铜	J	5.269mV	-40~600	750	O、N、R、V	热电势值较大,价格低廉,多用于工业测量
铜—康铜	T	4.279mV	-200~350	400	O、N、R、V	准确度较高,性能稳定,线性好,价格便宜;广泛用于低温测量

注:表中 O 为氧化气氛,N 为中性气氛,R 为还原气氛,V 为真空。

(2) 标准化热电偶的主要性能和特点。

① 贵金属热电偶:贵金属热电偶主要指铂铑合金、铂系列热电偶,由铂铑合金丝及纯铂丝构成。这个系列的热电偶使用温区宽,特性稳定,可以测量较高温度。由于可以得到高纯度材质,所以它们的测量精度较高,一般用于精密温度测量。但是所产生的热电势小,热电特性非线性较大,且价格较贵。铂铑₁₀-铂热电偶(S 型)、铂铑₁₃-铂热电偶(R 型)在 1300℃ 以下可长时间使用,短时间可测 1600℃;由于热电势小,300℃ 以下灵敏度低,300℃ 以上精确度最高;它在氧化气氛中物理化学稳定性好,但在高温情况下易受还原性气氛及金属蒸汽沾污而降低测量准确度。铂铑₃₀-铂铑₆热电偶(B 型)是氧化气氛中上限温度最高的热电偶,但是它的热电势最小,600℃ 以下灵敏度低,当参比端温度在 100℃ 以下时,可以不必修正。

② 廉价金属热电偶:由价廉的合金或纯金属材料构成。镍基合金系列中有镍铬-镍硅(铝)热电偶(K 型)和镍铬硅-镍硅热电偶(N 型),这两种热电偶性能稳定,产生的热电势大;

热电特性线性好,复现性好;高温下抗氧化能力强;耐辐射;使用范围宽,应用广泛。镍铬-铜镍(康铜)热电偶(E型)热电势大,灵敏度最高,可以测量微小温度变化,但是重复性较差。铜-康铜热电偶(T型)稳定性较好,测温精度较高,是在低温区应用广泛的热电偶。铁-康铜热电偶(J型)有较高灵敏度,在 700°C 以下热电特性基本为线性。目前,我国石油化工行业最常用的热电偶有K、E和T型。

(3) 标准化热电偶分度表。

根据国际温标规定,在 $T_0=0^{\circ}\text{C}$ (即冷端为 0°C)时,用实验的方法测出各种不同热电极组合的热电偶在不同的工作温度下所产生的热电势值,列成一张张表格,这就是热电偶分度表。

各种热电偶在不同温度下的热电势值都可以从热电偶分度表中查到。显然,当 $T=0^{\circ}\text{C}$ 时,热电势为零。温度与热电势之间的关系也可以用函数形式表示,称为参考函数。新的ITS-90的分度表和参考函数是由国际电工委员会和国际计量委员会合作,由国际上有权威的研究机构(包括中国在内)共同参与完成,它是热电偶测温的主要依据。有关标准热电偶K型和E型的分度表参见附录A和附录B。图5-13所示为几种常见热电偶的温度与热电势值的特性曲线。

从分度表中可以得出如下结论:

① $T=0^{\circ}\text{C}$ 时,所有型号热电偶的热电势值均为零;温度越高,热电势值越大; $T<0^{\circ}\text{C}$ 时,热电势为负值。

② 不同型号的热电偶在相同温度下,热电势值有较大的差别;在所有标准化热电偶中,B型热电偶热电势值最小,E型热电偶为最大。

③ 如果做出温度—热电势曲线,如图5-13所示,可以看出温度与热电势的关系一般为非线性。由于热电偶的这种非线性特性,当冷端温度 $T_0\neq 0^{\circ}\text{C}$ 时,不能用测得的电动势 $E(T, T_0)$ 直接查分度表得出的温度,加上 T_0 来得出被测温度。应该根据下列公式先求出 $E(T, 0)$,然后再查分度表,得到温度 T 。

$$E(T, 0) = E(T, T_0) + E(T_0, 0) \quad (5-14)$$

式中: $E(T, 0)$ ——冷端为 0°C ,测量端为 $T^{\circ}\text{C}$ 时的电势值;

$E(T, T_0)$ ——冷端为 $T_0^{\circ}\text{C}$,测量端为 $T^{\circ}\text{C}$ 时的电势值,即仪表测出的回路电势值;

$E(T_0, 0)$ ——冷端为 0°C ,测量端为 $T_0^{\circ}\text{C}$ 时的电势值,即冷端温度不为 0°C 时的热电势较正值。

3) 非标准化热电偶

非标准化热电偶发展很快,主要目的是进一步扩展高温和低温的测量范围。例如钨铼系列热电偶,这是一类高温难融合金热电偶,用于高温测量,最高测量温度可达 2800°C ,但其均匀性和再现性较差,经历高温后会变脆。虽然我国已有产品,也能够使用,并建立了我国的行业标准,但由于对这一类热电偶的研究还不够成熟,还没有建立国际统一的标准和分度表,使用前需个别标定,以确定热电势和温

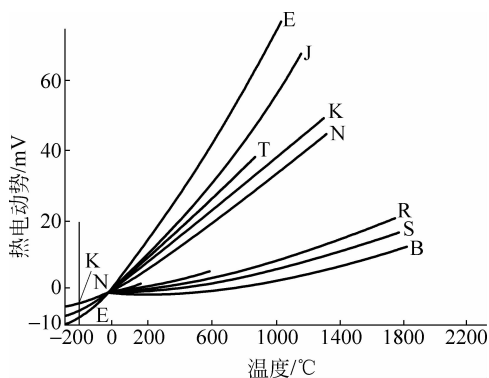


图 5-13 标准化热电偶热电特性曲线

度之间的关系。

4. 工业热电偶的结构形式

将两热电极的一个端点紧密地焊接在一起组成接点就构成了热电偶。工业用热电偶必须长期工作在恶劣环境中,为保证在使用时能够正常工作,热电偶需要良好的电绝缘,并需用保护套管将其与被测介质相隔离。根据其用途、安装位置和被测对象的不同,热电偶的结构形式是多种多样的,下面介绍几种比较典型的结构形式。

1) 普通型热电偶

普通型热电偶为装配式结构,又称为装配式热电偶。一般由热电极、绝缘管、保护套管和接线盒等部分组成,如图 5-14 所示。

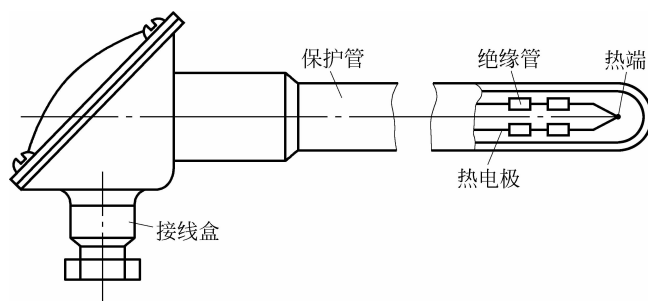


图 5-14 普通型热电偶的典型结构

热电极是组成热电偶的两根热偶丝,热电极的直径由材料的价格、机械强度、电导率以及热电偶的用途和测量范围等决定。贵金属热电极直径不大于 0.5mm,廉金属热电极直径一般为 0.5~3.2mm。

绝缘管(又称绝缘子)用于防止两根热电极短路。材料的选用由使用温度范围而定,其结构形式通常有单孔管、双孔管及四孔管等,套在热电极上。

保护套管是套在热电极、绝缘子的外边,其作用是保护热电极不受化学腐蚀和机械损伤。保护套管材料的选择一般根据测温范围、插入深度以及测温的时间常数等因素来决定。对保护套管材料的要求是:耐高温、耐腐蚀、有足够的机械强度、能承受温度的剧变、物理化学特性稳定,有良好的气密性和具有高的热导系数。最常用的材料是铜及铜合金、钢和不锈钢以及陶瓷材料等,其结构一般有螺纹式和法兰式两种。

接线盒是供热电极和补偿导线连接之用的。它通常用铝合金制成,一般分为普通式和密封式两种。为了防止灰尘和有害气体进入热电偶保护套管内,接线盒的出线孔和盖子均用垫片和垫圈加以密封。接线盒内用于连接热电极和补偿导线的螺丝必须固紧,以免产生较大的接触电阻而影响测量的准确度。

整支热电偶长度由安装条件和插入深度决定,一般为 350~2000mm。这种结构的热电偶热容量大,因而热惯性大,对温度变化的响应慢。

2) 铠装型热电偶

铠装型热电偶是将热电偶丝、绝缘材料和金属保护套管三者组合装配后,经拉伸加工而成的一种坚实的组合体。它的结构形式和外表与普通型热电偶相仿,如图 5-15 所示。与普通热电偶不同之处是:热电偶与金属保护套管之间被氧化镁或氧化铝粉末绝缘材料填实,

三者合为一体；具有一定的可挠性。一般情况下，最小弯曲半径为其直径的 5 倍，安装使用方便。套管材料一般采用不锈钢或镍基高温合金，绝缘材料采用高纯度脱水氧化镁或氧化铝粉末。

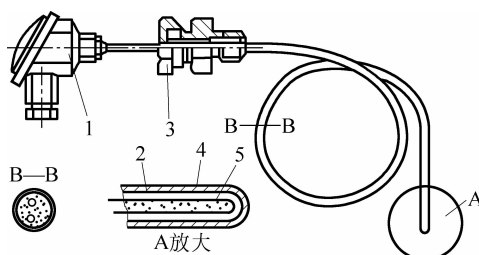


图 5-15 铠装型热电偶的典型结构

1—接线盒；2—金属套管；3—固定装置；4—绝缘材料；5—热电极

铠装热电偶工作端的结构形式多样，有接壳型、绝缘型、露头型和帽型等形式，如图 5-16 所示。其中以露头和接壳型动态特性较好。接壳型是热电极与金属套管焊接在一起，其反应时间介于绝缘型和露头型之间；绝缘型的测量端封闭在完全焊合的套管里，热电偶与套管之间是互相绝缘的，是最常用的一种形式；露头型的热电偶测量端暴露在套管外面，仅适用于干燥的非腐蚀介质中。

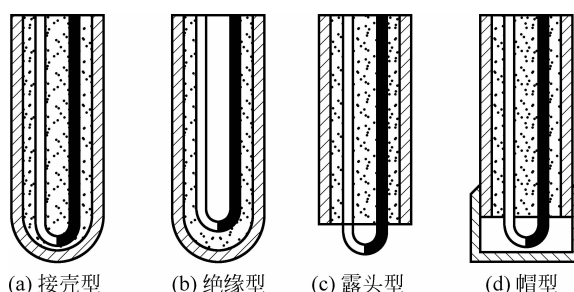


图 5-16 铠装热电偶工作端结构

铠装热电偶的外径一般为 0.5~8mm，热电极有单丝、双丝及四丝等，套管壁厚为 0.07~1mm，其长度可以根据需要截取。热电偶冷端可以用接线盒或其他形式的接插件与外部导线连接。由于铠装热电偶的金属套管壁薄，热电极细，因而相同分度号的铠装热电偶较普通热电偶使用温度要低或使用寿命要短。

铠装热电偶的突出优点之一是动态特性好，测量端热容量小，因而热惯性小，对温度变化响应快，更适合温度变化频繁以及热容量较小对象的温度测量。另外，由于结构小型化，易于制成特殊用途的形式，挠性好，可弯曲，可以安装在狭窄或结构复杂的测量场合，因此各种铠装热电偶的应用也比较广泛。

3) 表面型热电偶

表面型热电偶常用的结构形式是利用真空镀膜法将两电极材料蒸镀在绝缘基底上的薄膜热电偶，是专门用来测量物体表面温度的一种特殊热电偶，其特点是反应速度极快、热惯性极小。它作为一种便携式测温计，在纺织、印染、橡胶、塑料等工业领域广泛应用。

热电偶的结构形式可根据它的用途和安装位置来确定。在热电偶选型时,要注意三个方面:热电极的材料;保护套管的结构、材料及耐压强度;保护套管的插入深度。

5. 热电偶冷端的延长

由热电偶的测温原理可知,只有当冷端温度 T_0 是恒定已知时,热电势才是被测温度的单值函数,测量才有可能,否则会带来误差。但通常情况下,冷端温度是不恒定的,原因主要在于如下两方面。一是由于热电偶的测量端和冷端靠得很近,热传导、热辐射都会影响到冷端温度;二是由于热电偶的冷端常常靠近设备和管道,且一般都在室外,冷端会受到周围环境、设备和管道温度的影响,造成冷端温度的不稳定。另外,与热电偶相连的检测仪表一般为了集中监视也不易安装在被测对象附近。所以为了准确测量温度,就应设法把热电偶的冷端延伸至远离被测对象,且温度又比较稳定的地方,如控制室内。

一种方法是将热电偶的偶丝(热电极)延长,但有的热电极属于贵金属,如铂系列热电偶,此时延长偶丝是不经济的。能否用廉价金属组成热电偶与贵金属相连来延伸冷端呢?通过大量实验发现,有些廉价金属热电偶在 $0\sim 100^\circ\text{C}$ 环境温度范围内,与某些贵金属热电偶具有相似的热电特性,即在相同温度下两种热电偶所产生的热电势值近似相等。如铜—康铜与镍铬—镍硅、铜—铜镍与铂铑₁₀—铂热电偶在 $0\sim 100^\circ\text{C}$ 范围内,热电特性相同,而原冷端到控制室两点之间的温度恰恰在 100°C 以下。所以,可以用廉价金属热电偶将原冷端延伸到远离被测对象,且环境温度又比较稳定的地方。这种廉价金属热电偶即称为补偿导线,这种方法称为补偿导线法,如图 5-17 所示。

在图 5-17 中,A、B 分别为热电偶的两个电极,A 为正极、B 为负极。C、D 为补偿导线的两个电极 C 为正极、D 为负极。 T' 是原冷端温度, T_0 是延伸后新冷端的温度, T' 、 T_0 均在 100°C 以下。则根据中间温度定则,此时热电偶回路电动势为

$$E = E_{AB}(T, T') + E_{CD}(T', T_0)$$

由于

$$E_{CD}(T', T_0) = E_{AB}(T', T_0)$$

有

$$E = E_{AB}(T, T') + E_{AB}(T', T_0) = E_{AB}(T, T_0) \quad (5-15)$$

可见,用补偿导线延伸后,其回路电势只与新冷端温度有关,而与原冷端温度变化无关。

通过上面的讨论可以看出,补偿导线也是热电偶,只不过是廉价金属组成的热电偶。不同的热电偶因其热电特性不同,必须配以不同的补偿导线,见表 5-3 常用热电偶补偿导线。另外,热电偶与补偿导线相接时必须保证延伸前后特性不变,因此,热电偶的正极必须与补偿导线的正极相连,负极与负极相连,且连接点温度相同,并在 $0\sim 100^\circ\text{C}$ 范围内。延伸后新冷端温度应尽量维持恒定。即使用补偿导线应注意以下几点:

- (1) 补偿导线与热电偶型号相匹配;
- (2) 补偿导线的正负极与热电偶的正负极要相对应,不能接反;
- (3) 原冷端和新冷端温度在 $0\sim 100^\circ\text{C}$ 范围内;
- (4) 当新冷端温度 $T_0 \neq 0^\circ\text{C}$ 时,还需进行其他补偿和修正。

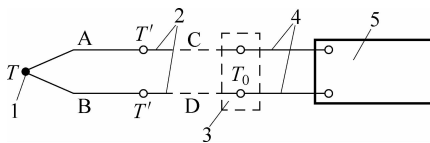


图 5-17 用补偿导线延长热电偶的冷端

1—测量端; 2—补偿导线; 3—冷端;

4—铜导线; 5—显示仪表

表 5-3 常用热电偶补偿导线

配用热电偶 类型	补偿导线 型号	色标		允差/℃			
		正	负	100℃		200℃	
				B 级	A 级	B 级	A 级
S,R	SC	红	绿	5	3	5	5
K	KC		蓝	2.5	1.5	—	—
	KX		黑	2.5	1.5	2.5	2.5
N	NC		浅灰	2.5	1.5	—	—
	NX		深灰	2.5	1.5	2.5	1.5
E	EX		棕	2.5	1.5	2.5	1.5
J	JX		紫	2.5	1.5	2.5	1.5
T	TX		白	2.5	0.5	1.0	0.5

注：补偿导线第二个字母含义，C—补偿型，X—延长型。

根据所用材料，补偿导线分为补偿型补偿导线(C)和延长型补偿导线(X)两类，见表 5-3。补偿型补偿导线材料与热电极材料不同，常用于贵金属热电偶，它只能在一定的温度范围内与热电偶的热电特性一致；延长型补偿导线是采用与热电极相同的材料制成，适用于廉价金属热电偶。应该注意到，无论是补偿型还是延长型的，补偿导线本身并不能补偿热电偶冷端温度的变化，只是起到将热电偶冷端延伸的作用，改变热电偶冷端的位置，以便于采用其他的补偿方法。另外，即使在规定的使用温度范围内，补偿导线的热电特性也不可能与热电偶完全相同，因而仍存有一定的误差。

6. 热电偶的冷端温度补偿

采用补偿导线后，把热电偶的冷端从温度较高和不稳定的地方，延伸到温度较低和比较稳定的控制室内，但冷端温度还不是 0℃。而工业上常用的各种热电偶的分度表或温度—热电势关系曲线都是在冷端温度保持为 0℃ 的情况下得到的，与它配套使用的仪表也是根据冷端温度为 0℃ 这一条件进行刻度的。由于控制室的温度往往高于 0℃，而且是不恒定的，因此，热电偶所产生的热电势必然比冷端为 0℃ 情况下所产生的热电势要偏小，且测量值也会随着冷端温度变化而变化，给测量结果带来误差。因此，在应用热电偶测温时，只有将冷端温度保持为 0℃，或者是进行一定的修正才能得到准确的测量结果。这样做，就称为热电偶的冷端温度补偿。一般采用下述几种方法。

1) 冷端温度保持 0℃ 法

保持冷端温度为 0℃ 的方法，又称冰浴法或冰点槽法，如图 5-18 所示。把热电偶的两个冷端分别插入盛有绝缘油的试管中，然后放入装有冰水混合物的保温容器中，用铜导线引出接入显示仪表，此时显示仪表的读数就是对应冷端为 0℃ 时的毫伏值。这种方法要经常检查，并补充适量的冰，始终保持保温容器中为冰水混合状态，因此使用起来比较麻烦，多用于实验室精密测量中，工业测量中一般不采用。

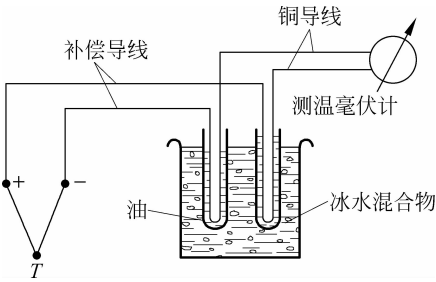


图 5-18 热电偶冷端温度保持 0℃ 法

2) 冷端温度计算校正法

在实际生产中,采用补偿导线将热电偶冷端移到温度 T_0 处, T_0 通常为环境温度而不是 0°C 。此时若用仪器测得的回路电势直接去查热电偶分度表,得出的温度就会偏低,引起测量误差,因此,必须对冷端温度进行修正。因为热电偶的分度表是在冷端温度是 0°C 时做出的,所以必须用仪器测得的回路电势加上环境温度 T_0 与冰点 0°C 之间温差所产生的热电势后,去查分度表,才能得到正确的测量温度,这样才能符合热电偶分度表的要求。一般情况下,先用温度计测出冷端的实际温度 T_0 ,在分度表上查得对应于 T_0 的 $E(T_0, 0)$,即校正值。依公式(5-14)

$$E(T, 0) = E(T, T_0) + E(T_0, 0)$$

将仪表测出的回路电势值 $E(T, T_0)$ 与此校正值相加,求得 $E(T, 0)$ 后,再反查分度表求出 T ,就得到了实际被测温度。

例 5-1 采用 E 分度号热电偶测量某加热炉的温度,测得的热电势 $E(T, T_0) = 66\,982\mu\text{V}$,冷端温度 $T_0 = 30^\circ\text{C}$ 。求被测的实际温度。

解 由 E 型热电偶分度表查得 $E(30, 0) = 1801\mu\text{V}$
则

$$E(T, 0) = E(T, 30) + E(30, 0) = 66\,982 + 1801 = 68\,783\mu\text{V}$$

再反查 E 型热电偶分度表,得实际温度为 900°C 。

例 5-2 计算 $E_K(650, 20)$ 。

解 $E_K(650, 20) = E_K(650, 0) - E_K(20, 0) = 27.022 - 0.798 = 26.244\mu\text{V}$

由于热电偶所产生的电动势与温度之间的关系都是非线性的(当然各种热电偶的非线性程度不同),因此在冷端温度不为零时,将所测得的电动势对应的温度加上冷端温度,并不等于实际温度。如例 5-1 中,测得的热电势为 $66\,982\mu\text{V}$,由分度表可查得对应的温度为 876.6°C ,如果加上冷端温度 30°C ,则为 906.6°C ,这与实际温度 900°C 有一定的误差。实际热电势与温度之间的非线性程度越严重,误差就越大。

可以看出,用计算校正法来补偿冷端温度的变化需要计算、查表,仅适用于实验室测温,不能应用于生产过程的连续测量。

3) 校正仪表零点法

如果热电偶的冷端温度比较稳定,与之配用的显示仪表零点调整比较方便,测量准确度要求又不太高时,可对仪表的机械零点进行调整。若冷端温度 T_0 已知,可将显示仪表机械零点直接调至 T_0 处,这相当于在输入热电偶回路热电势之前,就给显示仪表输入了一个电势 $E(T_0, 0)$ 。这样,接入热电偶回路后,输入显示仪表的电势相当于 $E(T, T_0) + E(T_0, 0) = E(T, 0)$,因此显示仪表可显示测量值 T 。在应用这种方法时应注意,冷端温度变化时要重新调整仪表的零点。如冷端温度变化频繁,不宜采用此法。调整零点时,应断开热电偶回路。

校正仪表零点法虽有一定的误差,但非常简便,在工业上经常采用。

4) 补偿电桥法

补偿电桥法又称为自动补偿法,可以对冷端温度进行自动的修正,保证连续准确地进行测量。

补偿电桥法利用不平衡电桥(又称补偿电桥或冷端补偿器)产生相应的电势,以补偿热电偶由于冷端温度变化而引起的热电势变化。如图 5-19 所示,补偿电桥由四个桥臂电阻

R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_t 和桥路稳压电源组成。其中的三个桥臂电阻 R_1 、 R_2 、 R_3 是由电阻温度系数很小的锰铜丝绕制的,其电阻值基本不随温度而变化。另一个桥臂电阻 R_t 由电阻温度系数很大的铜丝绕制,其阻值随温度而变化。

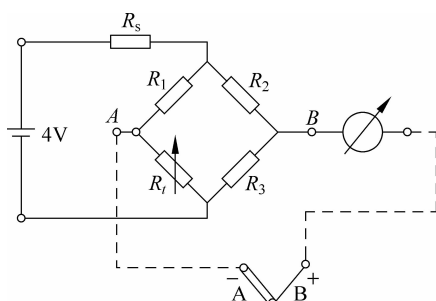


图 5-19 补偿电桥法示意图

将补偿电桥串接在热电偶回路中,热电偶用补偿导线将其冷端连接到补偿器,使冷端与 R_t 电阻所处的温度一致。因为一般显示仪表都是工作在常温下,通常不平衡电桥取在 20°C 时平衡。即冷端为 20°C 时, $R_t = R_{t_0} = R_{20}$, 电桥平衡。设计 $R_1 = R_2 = R_3 = R_{20}$, 桥路平衡无信号输出,即 $V_{AB} = 0$ 。此时测温回路电势

$$E = E_{AB}(t, t_0) + V_{AB} = E_{AB}(t, 20)$$

当冷端温度变化时,电桥将输出不平衡电压。设冷端温度升高(大于 20°C)至 t_1 , 此时 $R_{t_1} \neq R_{t_0}$,

电桥不平衡, $V_{AB} \neq 0$, 回路中电动势为

$$\begin{aligned} E &= E_{AB}(t, t_1) + V_{AB} = E_{AB}(t, t_0) - E_{AB}(t_1, t_0) + V_{AB} \\ &= E_{AB}(t, 20) - E_{AB}(t_1, 20) + V_{AB} \end{aligned}$$

选择适当的电阻 R_t , 使电桥的输出电压 V_{AB} 可以补偿因冷端变化而引起的回路热电势变化量。即用 R_t 的变化引入的不平衡电压 V_{AB} 来抵消 t_0 变化引入的热电势 $E_{AB}(t_1, t_0)$, 即 $E_{AB}(t_1, 20)$ 的值。使

$$-E_{AB}(t_1, 20) + V_{AB} = 0, \quad V_{AB} = E_{AB}(t_1, 20)$$

此时,回路电势 $E = E_{AB}(t, 20)$, 与 t_0 没有变化时相等,保持显示仪表接收的电势不变,即所指示的测量温度没有因为冷端温度的变化而变化,达到了自动补偿冷端温度变化的目的。请读者推证,如果冷端温度降低,即 t_1 低于 20°C , 补偿电桥是如何工作的。

使用补偿电桥时应注意:

(1) 由于电桥是在 20°C 时平衡,需将显示仪表机械零点预先调至 20°C , 如果补偿电桥是按 0°C 时平衡设计的,则零点应调至 0°C ;

(2) 补偿电桥、热电偶、补偿导线和显示仪表型号必须匹配;

(3) 补偿电桥、热电偶、补偿导线和显示仪表的极性不能接反,否则将带来测量误差。

5) 补偿热电偶法

在实际应用中,为了节省补偿导线和投资费用,常用多只热电偶配用一台测温仪表。通过切换开关实现多点间歇测量,其接线如图 5-20 所示。补偿热电偶 C、D 的材料可以与测量热电偶材料相同,也可以是测量热电偶的补偿导线。设置补偿热电偶是为了使多只热电偶的冷端温度保持恒定,为了达到此目的,将补偿热电偶的工作端插入 $2 \sim 3\text{m}$ 的地下或放在一个恒温器中,使其温度恒定为 t_0 。补偿热电偶的与多支热电偶的冷端都接在温度为 t_1 的同一个接线盒中。于是,根据热电偶测温的中间温度定则不难证明,这时测温仪表的指示值则为 $E(t, t_0)$ 所对应的温度,而不受接线盒处温度 t_1 变化的影响,同时实现了多只热电偶的冷端温度补偿。

6) 软件修正法

在计算机控制系统中,有专门设计的热电偶信号采集卡(I/O 卡中的一种),一般有 8 路

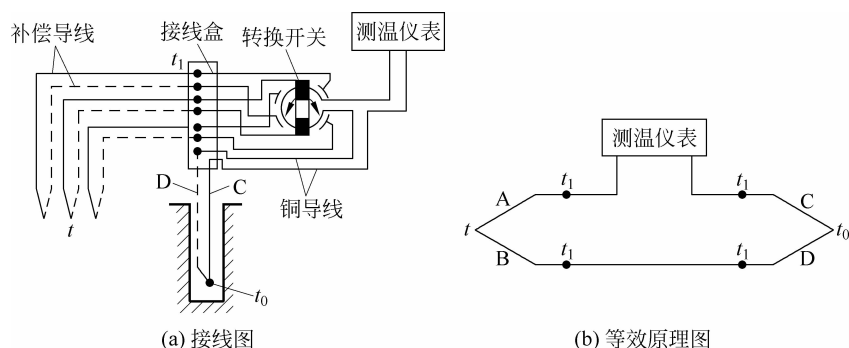


图 5-20 补偿热电偶连接线路

或 16 路信号通道,并带有隔离、放大、滤波等处理电路。使用时要求把热电偶通过补偿导线与采集卡上的输入端子连接起来,在每一块卡上的接线端子附近安装有热敏电阻。在采集卡驱动程序的支持下,计算机每次都采集各路热电势信号和热敏电阻信号。根据热敏电阻信号可得到 $E(t_0, 0)$,再按照前面介绍的计算校正法自动计算出每一路的 $E(t, 0)$ 值,就可以得到准确的温度了。这种方法是在热电偶信号采集卡硬件的支持下,依靠软件自动计算来完成热电偶冷端处理和补偿功能的。

7) 一体化温度变送器

所谓一体化温度变送器,就是将变送器模块安装在测温元件接线盒内的一种温度变送器,使变送器模块与测温元件形成一个整体。这种温度变送器具有参比端温度补偿功能,不需要补偿导线,输出信号为 $4\sim 20\text{mA}$ 或 $0\sim 10\text{mA}$ 标准信号,适用于 $-20\sim 100^\circ\text{C}$ 的环境温度,精确度可达 $\pm 0.2\%$,配用这种装置可简化测温电路设计。这种变送器具有体积小、重量轻,现场安装方便等优点,因而在工业生产中得到广泛应用。

5.2.3 热电阻温度计

物质的电阻率随温度的变化而变化的特性称为热电阻效应,利用热电阻效应制成的检测元件称为热电阻(RTDs)。

热电阻式温度检测元件分为两大类,由金属或合金导体制作的金属热电阻和由金属氧化物或半导体制作的半导体热敏电阻。一般把金属热电阻称为热电阻,而把半导体热电阻称为热敏电阻。

大多数金属电阻具有正的电阻温度系数,温度越高电阻值越大。一般温度每升高 1°C ,电阻值约增加 $0.4\%\sim 0.6\%$ 。半导体热敏电阻大多具有负温度系数,温度每升高 1°C ,电阻值约减少 $2\%\sim 6\%$ 。利用上述特性,可实现温度的检测。

1. 金属热电阻

由金属导体制成的热电阻称为金属热电阻。

1) 测温原理及特点

金属热电阻测温基于导体的电阻值随温度而变化的特性。由导体制成的感温器件称为热电阻。由于温度的变化,导致了金属导体电阻的变化。这样只要设法测出电阻值的变化,就可达到温度测量的目的。由此可知,热电阻温度计与热电偶温度计的测量原理是不相同

的。热电阻温度计是把温度的变化通过测温元件热电阻转换为电阻值的变化来测量温度的；而热电偶温度计则是把温度的变化通过测温元件热电偶转化为热电势的变化来测量温度的。

热电阻测温的优点是信号可以远传、输出信号大、灵敏度高、无须进行冷端补偿。金属热电阻稳定性高、互换性好、准确度高，可以用作基准仪表。其缺点是需要电源激励、不能测高温和瞬时变化的温度。测温范围为 $-200\sim+850^{\circ}\text{C}$ ，一般用在 500°C 以下的测温，适用于测量 $-200\sim+500^{\circ}\text{C}$ 范围内液体、气体、蒸汽及固体表面的温度。

2) 热电阻材料

虽然大多数金属导体的电阻值随温度的变化而变化，但是它们并不都能作为测温用的热电阻，对热电阻的材料选择有如下要求。

(1) 选择电阻随温度变化成单值连续关系的材料，最好是呈线性或平滑特性，这一特性可以用分度公式和分度表描述。

(2) 有尽可能大的电阻温度系数。

通常取 $0\sim100^{\circ}\text{C}$ 之间的平均电阻温度系数 $\alpha=\frac{R_{100}}{R_0}\times\frac{1}{100}$ 。电阻温度系数 α 与金属的纯度有关，金属越纯， α 值越大。 α 值的大小表示热电阻的灵敏度，它是由电阻比 $W_{100}=\frac{R_{100}}{R_0}$ 所决定的，热电阻材料纯度越高， W_{100} 值越大，热电阻的精度和稳定性就越好。 W_{100} 是热电阻的重要技术指标。

(3) 有较大的电阻率，以便制成小尺寸元件，减小测温热惯性。 0°C 时的电阻值 R_0 很重要，要合适的大小，并有允许误差要求。

(4) 在测温范围内物理化学性能稳定。

(5) 复现性好，复制性强，易于得到高纯物质，价格较便宜。

目前使用的金属热电阻材料有铜、铂、镍、铁等，实际应用最多的是铜、铂两种材料，并已实行标准化生产。

3) 常用工业热电阻

目前工业上应用最多的热电阻有铂热电阻和铜热电阻。

(1) 铂电阻：铂电阻金属铂易于提纯，在氧化性介质中，甚至在高温下其物理、化学性质都非常稳定。但在还原性介质中，特别是在高温下很容易被沾污，使铂丝变脆，并改变了其电阻与温度间的关系，导致电阻值迅速漂移。因此，要特别注意保护。铂热电阻的使用范围为 $-200\sim850^{\circ}\text{C}$ ，体积小，精度高，测温范围宽，稳定性好，再现性好，但是价格较贵。

根据国际实用温标的规定，在不同温度范围内，电阻与温度之间的关系也不同。其电阻与温度的关系为：

在 $-200\sim0^{\circ}\text{C}$ 范围内时

$$R(t) = R_0[1 + At + Bt^2 + C(t - 100)t^3] \quad (5-16)$$

在 $0\sim850^{\circ}\text{C}$ 范围内时

$$R(t) = R_0(1 + At + Bt^2) \quad (5-17)$$

式中： $R(t)$ —— $t^{\circ}\text{C}$ 时铂电阻值；

R_0 —— 0°C 时铂电阻值；

A 、 B 、 C ——常数,其中, $A=3.908\,03\times 10^{-3}(1/^{\circ}\text{C})$, $B=-5.775\times 10^{-7}(1/^{\circ}\text{C}^2)$, $C=-4.183\times 10^{-12}(1/^{\circ}\text{C}^3)$ 。

一般工业上使用的铂热电阻,国标规定的分度号有 Pt10 和 Pt100 两种,即相应的 0°C 时的电阻值分别为 $R_0=10\Omega$ 和 $R_0=100\Omega$ 。

铂电阻的 W_{100} 值越大,铂电阻丝纯度越高,测温精度也越高。国际实用温标规定:作为基准器的铂热电阻,其 $W_{100}\geq 1.392\,56$,与之相应的铂纯度为 99.9995% ,测温精度可达 $\pm 0.001^{\circ}\text{C}$,最高可达 $\pm 0.0001^{\circ}\text{C}$;作为工业用标准铂电阻, $W_{100}\geq 1.391$,其测温精度在 $-200\sim 0^{\circ}\text{C}$ 之间为 $\pm 1^{\circ}\text{C}$,在 $0\sim 100^{\circ}\text{C}$ 之间为 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$,在 $100\sim 850^{\circ}\text{C}$ 之间为 $\pm (0.5\%)t^{\circ}\text{C}$ 。

不同分度号的铂电阻因为 R_0 不同,在相同温度下的电阻值是不同的,因此电阻与温度的对应关系,即分度表也是不同的。Pt100 分度表可见附录 C。

(2) 铜电阻:铜热电阻一般用于 $-50\sim 150^{\circ}\text{C}$ 范围内的温度测量。其特点是电阻与温度之间的关系接近线性,电阻温度系数大,灵敏度高,材料易提纯,复制性好,价格便宜。但其电阻率低,体积较大,易氧化,一般只适用于 150°C 以下的低温和没有水分及无腐蚀性介质的温度测量。

铜电阻与温度的关系为

$$R(t) = R_0(1 + At + Bt^2 + Ct^3) \quad (5-18)$$

式中: $R(t)$ —— $t^{\circ}\text{C}$ 时铜电阻值;

R_0 —— 0°C 时铜电阻值;

A 、 B 、 C ——分别为常数,其中, $A=4.288\,99\times 10^{-3}(1/^{\circ}\text{C})$, $B=-2.133\times 10^{-7}(1/^{\circ}\text{C}^2)$, $C=1.233\times 10^{-9}(1/^{\circ}\text{C}^3)$ 。

由于 B 和 C 很小,某些场合可以近似表示为

$$R(t) = R_0(1 + \alpha t) \quad (5-19)$$

式中: α ——电阻温度系数,取 $\alpha=4.28\times 10^{-3}(1/^{\circ}\text{C})$ 。

国内工业用铜热电阻的分度号为分度号 Cu50 和 Cu100,即相应的 0°C 时的电阻值分别为 $R_0=50\Omega$ 和 $R_0=100\Omega$ 。Cu100 分度表可见附录 D。

铜电阻的 $W_{100}\geq 1.425$ 时,其测温精度在 $-50\sim 50^{\circ}\text{C}$ 范围内为 $\pm 5^{\circ}\text{C}$,在 $50\sim 100^{\circ}\text{C}$ 之间为 $\pm (1\%)t^{\circ}\text{C}$ 。

另外,铁和镍两种金属也有较高的电阻率和电阻温度系数,亦可制成体积小,灵敏度高的热电阻温度计。但由于铁容易氧化,性能不太稳定,故尚未使用。镍的稳定性较好,已定型生产,可测范围为 $-60\sim 180^{\circ}\text{C}$, R_0 值有 100Ω 、 300Ω 和 500Ω 三种。

工业热电阻分类及特性见表 5-4。

表 5-4 工业热电阻分类及特性

项 目	铂热电阻		铜热电阻	
分度号	Pt100	Pt10	Cu100	Cu50
R_0/Ω	100	10	100	50
$\alpha/^{\circ}\text{C}$	0.003 85		0.004 28	
测温范围/ $^{\circ}\text{C}$	$-200\sim 850$		$-50\sim 150$	
允差/ $^{\circ}\text{C}$	A 级: $\pm(0.15+0.002 t)$ B 级: $\pm(0.30+0.005 t)$		$\pm(0.30+0.006 t)$	

4) 工业热电阻的结构

工业热电阻主要有普通型、铠装型和薄膜型三种结构形式。

(1) 普通型热电阻：普通型热电阻其结构如图 5-21(a)所示，主要由电阻体、内引线、绝缘套管、保护套管和接线盒等部分组成。

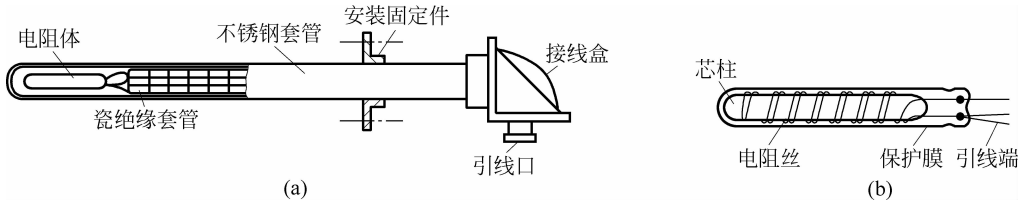


图 5-21 普通热电阻结构图

电阻体是由细的铂丝或铜丝绕在绝缘支架上构成，为了使电阻体不产生电感，电阻丝要用无感绕法绕制，如图 5-21(b)所示，将电阻丝对折后双绕，使电阻丝的两端均由支架的同一侧引出。电阻丝的直径一般为 0.01~0.1mm，由所用材料及测温范围决定。一般铂丝为 0.05 mm 以下，铜丝为 0.1mm。

连接电阻体引出端和接线盒之间的引线为内引线。其材料最好是采用与电阻丝相同，或者与电阻丝的接触电势较小的材料，以免产生感应电动势。工业热电阻中，铂电阻高温用镍丝，中低温用银丝做引出线，这样既可降低成本，又能提高感温元件的引线强度。铜电阻和镍电阻的内引线，一般均采用本身的材料，即铜丝和镍丝。为了减小引线电阻的影响，其直径往往比电阻丝的直径大得多。工业用热电阻的内引线直径一般为 1mm 左右，标准或实验室用直径为 0.3~0.5mm。内引线之间也采用绝缘子将其绝缘隔离。

保护套管和接线盒的要求与热电偶相同。

(2) 铠装型热电阻：铠装热电阻用铠装电缆作为保护管-绝缘物-内引线组件，前端与感温元件连接，外部焊接短保护管，组成铠装热电阻。铠装热电阻外径一般为 2~8mm，其特点是体积小，热响应快，耐振动和冲击性能好，除感温元件部分外，其他部分可以弯曲，适合在复杂条件下安装。

(3) 薄膜型热电阻：将热电阻材料通过真空镀膜法，直接蒸镀到绝缘基底上。这种热电阻的体积小、热惯性小、灵敏度高，可紧贴物体表面测量，多用于特殊用途。

5) 热电阻的测量线路

采用热电阻作为测温元件时，温度的变化转换为电阻值的变化，这样对温度的测量就转化为对电阻值的测量。怎样将热电阻值的变化检测出来呢？最常用的测量线路是采用电桥。热电阻的输入电桥又分为不平衡电桥和平衡电桥。

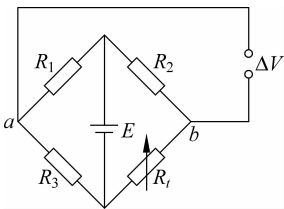


图 5-22 不平衡电桥原理图

(1) 不平衡电桥：图 5-22 为不平衡电桥的原理图。热电阻 R_t 作为电桥的一个桥臂， R_1 、 R_2 和 R_3 为固定锰铜电阻，分别为电桥的另三个桥臂。当温度变化时，电桥就失去平衡，输出不平衡电压 ΔV 。输出变化越大时，电桥不平衡越厉害，输出不平衡电压越大。这样，就将温度的变化转换成了不平衡电压的输出。

电桥的一个对角接稳压电源 E ，另一个对角接显示仪表。设 $R_t = R_{t_0}$ 时电桥平衡。设计时，一般取 $R_1 = R_{t_0}$ ， $R_2 = R_3$ ，此时

$R_2 R_3 = R_1 R_{t_0}$, $\Delta V = 0$ 。现将 R_t 置于某一温度 t , 当测温点温度 t 变化时, R_t 就变化, $R_2 R_3 \neq R_1 R_{t_0}$, 使 $\Delta V \neq 0$ 。 t 变化越大, ΔV 变化就越大, 这样就可以根据不平衡电压的大小来测量温度。

(2) 热电阻的引线方式: 热电阻的引线方式有二线制、三线制和四线制三种, 如图 5-23 所示。

① 二线制方式: 二线制方式是在热电阻两端各连一根导线, 如图 5-23(a) 所示。这种引线方式简单、费用低。但是工业热电阻安装在测量现场, 而与其配套的温度指示仪表或数据采集卡要安装在控制室, 其间引线很长。如果用两根导线把热电阻和仪表相连, 则相当于把引线电阻也串接加入到测温电阻中, 而引线有长短和粗细之分, 也有材质的不同。由于热电阻的阻值较小, 所以连接导线的电阻值不能忽视, 对于 50Ω 的测量电桥, 1Ω 的导线电阻就会产生约 5°C 的误差。另外, 引线在不同的环境温度下电阻值也会发生变化, 会带来附加误差。

② 三线制方式: 为了避免或减少导线电阻对测量的影响, 工业热电阻大都采用三线制连接方式。三线制方式是在热电阻的一端连接两根导线(其中一根作为电源线), 另一端连接一根导线, 如图 5-23(b) 所示。当热电阻与测量电桥配用时, 分别将两端引线接入两个桥臂, 就可以较好地消除引线电阻影响, 提高测量精度。

③ 四线制方式: 四线制方式是在热电阻两端各连两根导线, 其中两根引线为热电阻提供恒流源, 在热电阻上产生的压降通过另外两根导线接入电势测量仪表进行测量, 如图 5-23(c) 所示。当电势测量端的电流很小时, 可以完全消除引线电阻对测量的影响, 这种引线方式主要用于高精度的温度检测。

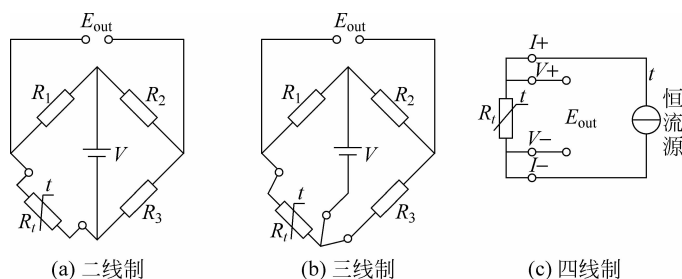


图 5-23 热电阻的三种引线方式

综上所述, 热电阻内部引线方式有两线制、三线制和四线制三种。二线制中引线电阻对测量影响大, 用于测量温度精度不高的场合。三线制可以减小热电阻与测量仪表之间连接导线的电阻所引起的测量误差, 广泛用于工业测量。四线制可以完全消除引线电阻对测量的影响, 但费用高, 用于高精度温度检测。

这里特别要注意的是, 无论是三线制还是四线制, 导线都必须从热电阻感温部位的根部引出, 不能从接线端子处引出, 否则仍会有影响。热电阻在实际使用时都会有电流通过, 电流会使电阻体发热, 使阻值增大。为了避免这一因素引起的误差, 一般流过热电阻的电流应小于 6mA , 在热电阻与电桥或电位差计配合使用时, 应注意共模电压给测量带来的影响。

(3) 平衡电桥: 平衡电桥是利用电桥的平衡来测量热电阻值变化的。图 5-24 是平衡电桥的原理图。图中 R_t 为热电阻, 它与 R_2 、 R_3 、 R_4 和 R_p 组成电桥; 电源电压为 E_0 ; 对角线

A、B 接入一检流计 G ; R_p 为一带刻度的滑线电阻。

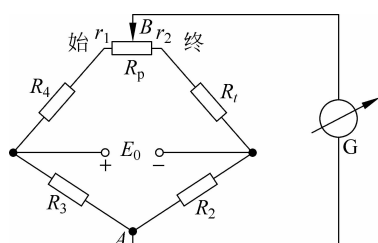


图 5-24 平衡电桥原理图

当被测温度为下限时, R_t 有最小值 R_{t_0} , 滑动触点应在 R_p 的左端, 此时电桥的平衡条件为

$$R_2 R_4 = R_3 (R_{t_0} + R_p) \quad (5-20)$$

当被测温度升高后, R_t 增加了 ΔR_t , 使得电桥不平衡。调节滑动触点至 B 处, 电桥再次平衡的条件是

$$R_2 (R_4 + r_1) = R_3 (R_{t_0} + \Delta R_t + R_p - r_1) \quad (5-21)$$

用式(3-21)减式(3-20), 有

$$R_2 r_1 = R_3 \Delta R_t - R_3 r_1$$

即

$$r_1 = \frac{R_3}{R_2 + R_3} \Delta R_t \quad (5-22)$$

从上式可以看出, 滑动触点 B 的位置就可以反映电阻的变化, 亦可以反映温度的变化, 并且可以看到触点的位移与热电阻的增量呈线性关系。

如果将检流计换成放大器, 利用被放大的不平衡电压去推动可逆电机, 使可逆电机再带动滑动触点 B 以达到电桥平衡, 这就是自动平衡电子电位差计的原理。

6) 电子电位差计

电子电位差计可以与热电阻、热电偶等测温元件配合, 作为温度显示之用, 具有测量精度高的特点。

用天平称量物体的重量时, 增减砝码使天平的指针指零, 砝码与被称量物体达到平衡, 此时被称量物体的质量就等于砝码的质量。电子电位差计的工作原理与天平称量原理相同, 是根据电压平衡法(也称补偿法、零值法)工作的。即将被测电势与已知的标准电压相比较, 当两者的差值为零时, 被测电势就等于已知的标准电压。

图 5-25 为电压平衡法原理图。其中 R 为线性度很高的锰铜线绕电阻, 由稳压电源供电, 这样就可以认为通过它的电流 I 是恒定的。 G 为检流计, 是灵敏度很高的电流计, E_t 为被测电动势。测量时, 可调节滑动触点 C 的位置, 使检流计中电流为零。此时, $V_{CB} = E_t$, 而 $V_{CB} = IR_{CB}$, 为已知的标准电压, 即 $E_t = IR_{CB}$ 。根据滑动触点的位置, 可以读出 V_{CB} , 达到了对未知电势测量的目的。

由上面的论述可以看出, 为了要在线绕电阻 R 上直接刻出 V_{CB} 的数值, 就得是工作电流 I 保持恒定值。实际工作中用电池代替稳压电源, 则需要对工作电流 I 进行校准, 如图 5-26 所示。

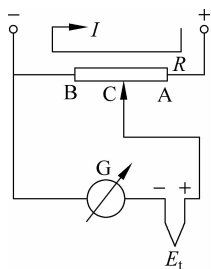


图 5-25 电压平衡法原理图

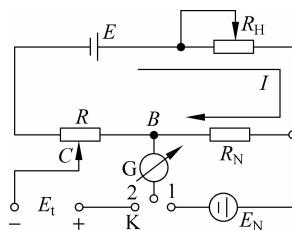


图 5-26 用标准电池校准工作电流

① 校准工作电流：将开关 K 合在“1”位置上，调节 R_H ，使流过检流计的电流为零，即检流计的指示为零，此时工作电流 I 在标准电阻 R_N 上的电压降与标准电池 E_N 电势相等，即 $E_N = IR_N$ ， $I = E_N/R_N$ 。因为 E_N 为标准电动势， R_N 为标准电阻，都是已知标准值，所以此时的电流 I 为仪表刻度时的规定值。

② 测量未知电势 E_t ：工作电流校准后，就可以将开关 K 合在“2”位置上，这时校准回路断开，测量回路接通。滑动触点 C 的位置，直至检流计指示为零，此时有

$$V_{BC} = IR_{BC} = \frac{E_N}{R_N} R_{BC} = E_t \quad (5-23)$$

R_{BC} 可由变阻器刻度读出，在 R_{BC} 上刻度出 $(E_N/R_N)R_{BC}$ ，就可直接读出 E_t 的值。

③ 自动电子电位差计：自动电子电位差计工作原理示意如图 5-27 所示，与手动电子电位差计的区别是，用放大器代替检流计，用可逆电机和机械传动机构代替人手操作。图中 E 表示直流电源， I 表示回路中产生的直流电流， U_K 表示在滑线电阻 R_H 上滑点 K 左侧的电压降， E_X 表示被测电动势。回路中可变电阻 R 用于调整回路电流 I 以达到额定工作电流，滑线电阻 R_H 用于被测电动势 E_X 的平衡比较。

由图 5-27 可知，放大器的输入是滑线电阻 R_H 上的电压降 U_K 与被测电动势 E_X 的代数差，即 $\Delta U = U_K - E_X$ 。该电势差经放大器放大后驱动可逆电机转动，并带动滑动触点 K 在滑线电阻 R_H 上左右移动。滑动触点 K 的移动产生新的电压降 U_K ，并馈入放大器输入端，从而形成常规的反馈控制回路。为保证电子电位差计的自动平衡，设计时要求该反馈回路具有负反馈效应，即当 $\Delta U \neq 0$ 时，放大器和可逆电机驱动滑点 K 的移动总能保证电势差 ΔU 向逐渐减小的方向变化。当电势差 $\Delta U = 0$ 时，

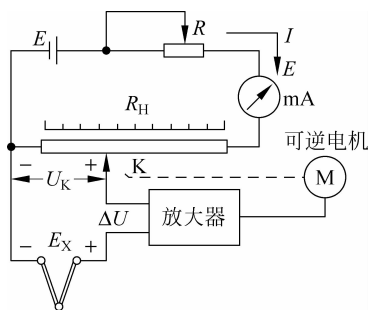


图 5-27 自动电子电位差计原理图

放大器输出为零，可逆电机停止转动，此时电位差计达到平衡状态，滑点 K 所对应的标尺刻度反映了被测电动势 E_X 的大小。

显然，由于电位差计是工作在负反馈闭环模式下的，其对被测电动势的测量和显示可自动完成。同时能够自动跟踪测量过程中平衡状态的变化，从而可以保证仪表自动显示和记录功能的实现。

2. 半导体热敏电阻

半导体热敏电阻又称为热敏电阻，它是用金属氧化物或半导体材料作为电阻体的温敏元件。其工作原理也是基于热电阻效应，即热敏电阻的阻值随温度的变化而变化。热敏电阻的测温范围为 $-100 \sim 300^\circ\text{C}$ 。与金属热电阻比，热敏电阻具有灵敏度高、体积小（热容量小），反应快等优点，它作为中低温的测量元件已得到广泛的应用。

热敏电阻有正温度系数、负温度系数和临界温度系数三种，它们的温度特性曲线如图 5-28 所示。温度检测用热敏电阻主要是负温度系数热敏电阻，PTC 和 CTR 热敏电阻则利用在特定温度下电阻值急剧变化的特性构成温度开关器件。

1) NTC 热敏电阻

负温度系数热敏电阻的阻值与温度的关系近似表示为

$$R_T = Ae^{\frac{B}{T}} \quad (5-24)$$

式中: T ——绝对温度, K;

R_T ——温度为 T 时的阻值, Ω ;

A, B ——取决于材料和结构的常数, Ω 和 K。

用曲线表示上述关系如图 5-28 中 NTC 曲线所示。由曲线可以看出, 温度越高, 其电阻值越小, 且其阻值与温度为非线性关系。

热敏电阻可以制成不同的结构形式, 有珠状、片状、杆状、薄膜状等。负温度系数热敏电阻主要由单晶以及锰、镍、钴等金属氧化物制成, 如有用于低温的锗电阻、碳电阻和渗碳玻璃电阻; 用于中高温的混合氧化物电阻。在 $-50 \sim 300^\circ\text{C}$ 范围, 珠状和柱状的金属氧化物热敏电阻的稳定性较好。

2) PTC 热敏电阻

具有正温度系数的 PTC 热敏电阻的特性曲线如图 5-28 中 PTC 曲线所示, 它是随着温度升高而阻值增大的, 曲线呈开关(突变)型。从曲线上可以看出, 这种热敏电阻在某一温度点其电阻值将产生阶跃式增加, 因而适于作为控制元件。

PTC 热敏电阻是用 BaTiO_3 掺入稀土元素使之半导体化而制成的。它的工作范围较窄, 在温度较低时灵敏度低, 而温度高时灵敏度迅速增加。

3) CTR 热敏电阻

CTR 临界温度热敏电阻是一种具有负的温度系数的开关型热敏电阻, 如图 5-28 中 CTR 曲线所示。它在某一温度点附近电阻值发生突变, 且在极度小温区内随温度的增加, 电阻值降低 3、4 个数量级, 具有很好的开关特性, 常作为温度控制元件。

热敏电阻的优点是电阻温度系数大, 为金属电阻的十几倍, 故灵敏度高; 电阻值高, 引线电阻对测温没有影响, 使用方便; 体积小, 热响应快; 结构简单可靠, 价格低廉; 化学稳定性好, 使用寿命长。缺点是非线性严重, 互换性差, 每一品种的测温范围较窄, 部分品种的稳定性差。由于这些特点, 热敏电阻作为工业用测温元件, 在汽车和家电领域得到大量的应用。

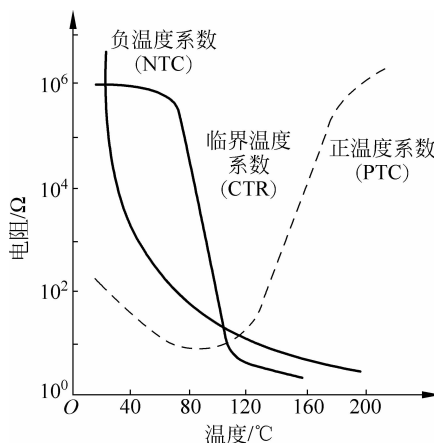


图 5-28 热敏电阻温度特性曲线

5.3 温度检测仪表的选用及安装

温度检测仪表的选用及安装应遵循下列原则。

5.3.1 温度检测仪表的选用

温度检测仪表有就地温度检测仪表和远传式温度检测仪表, 后者一般称为温度检测元件。

1. 就地温度仪表的选用

就地温度仪表的选用要从精度等级、测量范围等方面来考虑。

1) 精度等级

(1) 一般工业用温度计, 选用 2.5、1.5 或 1.0 级。

(2) 精密测量用温度计,选用 0.5 级或以上仪表。

2) 测量范围

(1) 最高测量值不大于仪表测量范围上限值的 90%,正常测量值在仪表测量范围上限值的 1/2 左右。

(2) 压力式温度计测量值应在仪表测量范围上限值的 1/2~3/4 之间。

3) 双金属温度计

在满足测量范围、工作压力和精度等级的要求时,应被优先选用于就地显示。

4) 压力式温度计

适用于-80℃以下低温、无法近距离观察、有振动及精度要求不高的就地或就地盘显示。

5) 玻璃温度计

仅用于测量精确度较高、振动较小、无机械损伤、观察方便的特殊场合。不得使用玻璃水银温度计。

2. 温度检测元件的选用

温度检测元件的选用包括热电偶、热电阻和热敏电阻的选用。

(1) 根据温度测量范围,参照表 5-5 选用相应分度号的热电偶、热电阻或热敏电阻。

表 5-5 常用温度检测元件

检测元件名称	分度号	测温范围/℃	R_{100}/R_0
铜热电阻 $R_0 = 50\Omega$	Cu50	-50~+150	1.248
$R_0 = 100\Omega$	Cu100		
铂热电阻 $R_0 = 10\Omega$	Pt10	-200~+650	1.385
铂热电阻 $R_0 = 100\Omega$	Pt100		
镍铬—镍硅热电偶	K	-200~+1300	
镍铬硅—镍硅热电偶	N	-200~+900	
镍铬—康铜热电偶	E	-200~+900	
铁—康铜热电偶	J	-200~+800	
铜—康铜热电偶	T	-200~+400	
铂铑 ₁₀ —铂热电偶	S	0~+1600	
铂铑 ₁₃ —铂热电偶	R	0~+1600	
铂铑 ₃₀ —铂铑 ₆ 热电偶	B	0~+1800	
钨铼 ₅ —钨铼 ₂₆ 热电偶	WRe ₅ -WRe ₂₆	0~+2300	
钨铼 ₃ —钨铼 ₂₅ 热电偶	WRe ₃ -WRe ₂₅	0~+2300	

(2) 铠装式热电偶适用于一般场合;铠装式热电阻适用于无振动场合;热敏电阻适用于测量反应速度快的场合。

3. 特殊场合适用的热电偶、热电阻

特殊场合应考虑选择如下热电偶、热电阻。

(1) 温度高于 870℃、氢含量大于 5%的还原性气体、惰性气体及真空场合,选用钨铼热电偶或吹气热电偶。

(2) 设备、管道外壁和转体表面温度,选用端(表面)式、压簧固定式或铠装热电偶、热

电阻。

(3) 含坚硬固体颗粒介质,选用耐磨热电偶。

(4) 在同一检出(测)元件保护管中,要求多点测量时,选用多点(支)热电偶。

(5) 为了节省特殊保护管材料,提高响应速度或要求检出元件弯曲安装时可选用铠装热电偶、热电阻。

(6) 高炉、热风炉温度测量,可选用高炉、热风炉专用热电偶。

5.3.2 温度检测仪表的安装

在石油化工生产过程中,温度检测仪表一般安装在工艺管道上或烟道中。下面针对这两种情况进行讨论。

1. 管道内流体温度的测量

通常采用接触式测温方法测量管道内流体的温度,测温元件直接插入流体中。接触式测温仪表所测得的温度都是由测温(感温)元件来决定的。在正确选择测温元件和二次仪表之后,如不注意测温元件的正确安装,那么,测量精度仍得不到保证。

为了正确地反映流体温度和减少测量误差,要注意合理地选择测点位置,并使测温元件与流体充分接触。工业上,一般是按下列要求进行安装的。

(1) 测点位置要选在有代表性的地点,不能在温度的死角区域,尽量避免电磁干扰。

(2) 在测量管道温度时,应保证测温元件与流体充分接触,以减少测量误差。因此,要求安装时测温元件应迎着被测介质流向插入,至少须与被测介质流向垂直(成 90°),切勿与被测介质形成顺流,如图 5-29 所示。

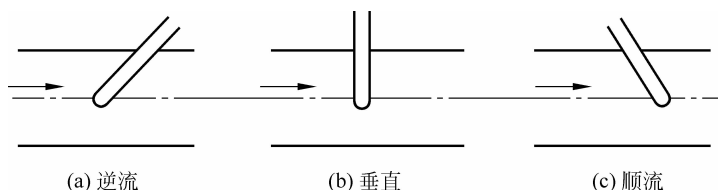


图 5-29 测温元件安装示意图(1)

(3) 测温元件的感温点应处于管道中流速最大处。一般来说,热电偶、铂电阻、铜电阻保护套管的末端应分别越过流束中心线 $5\sim 10\text{mm}$ 、 $50\sim 70\text{mm}$ 、 $25\sim 30\text{mm}$ 。

(4) 测温元件应有足够的插入深度,以减小测量误差。为此,测温元件应斜插安装或在弯头处安装,如图 5-30 所示。

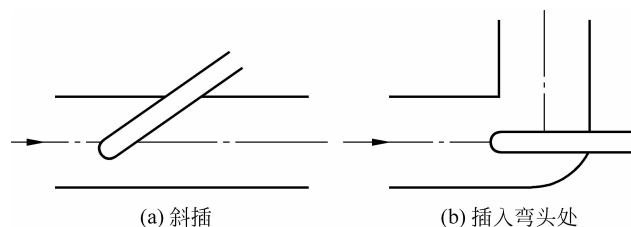


图 5-30 测温元件安装示意图(2)

(5) 若工艺管道过小(直径小于 80mm),安装测温元件处应接装扩大管,如图 5-31 所示。

(6) 热电偶、热电阻的接线盒面盖应该在上面,以避免雨水或其他液体、脏物进入接线盒中影响测量,如图 5-32 所示。

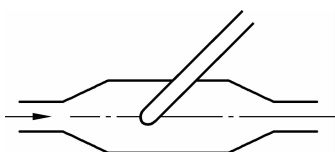


图 5-31 扩大管安装示意图

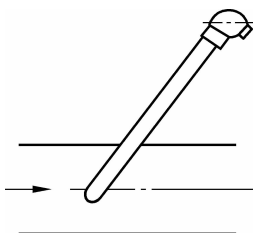


图 5-32 热电偶或热电阻安装示意图

(7) 为了防止热量散失,在测点引出处要有保温材料隔热,以减少热损失带来的测量误差。

(8) 测温元件安装在负压管道中时,必须保证其密封性,以防外界冷空气进入,使读数降低。

2. 烟道中烟气温度的测量

烟道的管径很大,测温元件插入深度有时可达 2m,应注意减低套管的导热误差和向周围环境的辐射误差。可以在测温元件外围加热屏蔽罩,如图 5-33 所示。也可以采用抽气的办法加大流速,增强对流换热,减少辐射误差。图 5-34 给出一种抽气装置的示意图,热电偶装于有多层屏蔽的管中,屏蔽管的后部与抽气器连接。当蒸汽或压缩空气通过抽气器时,会夹带着烟气以很高的流速流过热电偶测量端。在抽气管路上加装的孔板是为了测量抽气流量,以计算测量处的流速来估计误差。

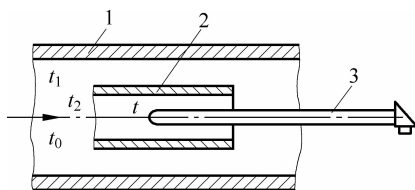


图 5-33 测温元件外围加热屏蔽罩

1—外壁; 2—屏蔽罩; 3—温度计

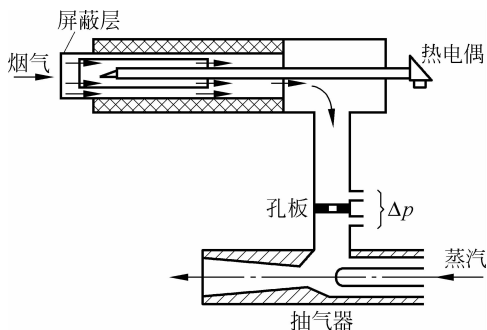


图 5-34 抽气装置示意图

3. 测温元件的布线要求

测温元件安装在现场,而显示仪表或计算机控制装置都在控制室内,所以要将测温元件测到的信号引入控制室内,就需要布线。工业上,一般是按下列要求进行布线的。

(1) 按照规定的型号配用热电偶的补偿导线,注意热电偶的正、负极与补偿导线的正、负极相连接,不要接错。

(2) 热电阻的线路电阻一定要符合所配二次仪表的要求。

(3) 为了保护连接导线与补偿导线不受外来的机械损伤,应把连接导线或补偿导线穿入钢管内或走槽板。

(4) 导线应有良好的绝缘。禁止与交流输电线合用一根穿线管,以免引起感应。

(5) 导线应尽量避免交流动力电线。

(6) 补偿导线不应有中间接头,否则应加装接线盒。另外,最好与其他导线分开敷设。

思考题与习题

- 5-1 什么是温标? 常用的温标有哪几种? 它们之间的关系如何?
- 5-2 按测温方式分,测温仪表分成哪几类? 常用温度检测仪表有哪些?
- 5-3 热电偶的测温原理和热电偶测温的基本条件是什么?
- 5-4 工业常用热电偶有哪几种? 试简要说明各自的特点。
- 5-5 现有 K、S、T 三种分度号的热电偶,试问在下列三种情况下,应分别选用哪种?
 - (1) 测温范围在 $600\sim 1100^{\circ}\text{C}$,要求测量精度高;
 - (2) 测温范围在 $200\sim 400^{\circ}\text{C}$,要求在还原性介质中测量;
 - (3) 测温范围在 $600\sim 800^{\circ}\text{C}$,要求线性度较好,且价格便宜。
- 5-6 用分度号为 K 的热电偶测温,其冷端温度为 20°C ,测得热电势 $E(t, 20) = 11.30\text{mV}$,试求被测温度 t 。
- 5-7 用 K 型热电偶测量某设备的温度,测得的热电势为 20mV ,冷端温度(室温)为 25°C ,求设备的温度。如果选用 E 型热电偶来测量,在相同的条件下,E 型热电偶测得的热电势是多少?
- 5-8 用热电偶测温时,为什么要使用补偿导线? 使用时应注意哪些问题?
- 5-9 用热电偶测温时,为什么要进行冷端温度补偿? 补偿的方法有哪几种?
- 5-10 试述热电阻测温原理。常用热电阻的种类有哪些? R_0 各为多少?
- 5-11 热电阻的引线方式有哪几种? 以电桥法测定热电阻的电阻值时,为什么常采用三线制接线方法?
- 5-12 用分度号 Pt100 铂电阻测温,在计算时错用了 Cu100 的分度表,查得的温度为 140°C ,问实际温度为多少?
- 5-13 热敏电阻有哪些种类? 各有什么特点? 各适用于什么场合?
- 5-14 试述接触式测温中,测温元件的安装和布线要求。
- 5-15 测量管道内流体的温度时,测温元件的安装如图 5-35 所示。试判断其中哪些是错的,哪些是对的(直接在图上标明),并简要说明理由。

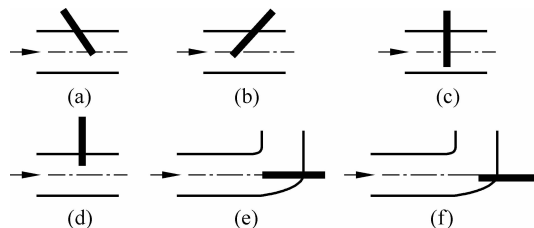


图 5-35 习题 5-15 测温元件安装图