

热 工 测 量

航空
航文庫
趙承龍 07.9.21

南京航空學院

趙承龍

1976.9.

目 录

第一章 温度测量	1
第一部分 热电偶高温计.....	1
✓ 第一节 什么是热电偶.....	1
✓ 第二节 热电偶材料.....	7
✓ 第三节 热电偶制作的基本知识.....	12
✓ 第四节 热电偶的冷端.....	18
✓ 第五节 测量仪表.....	25
第六节 几种常用的热电偶线路.....	32
第七节 气流温度测量.....	38
第八节 壁面温度测量.....	68
第二部分 电阻温度计和玻璃温度计.....	79
第一节 什么是电阻温度计.....	79
第二节 电阻温度计的分度表.....	87
第三节 测量电阻的仪表.....	89
第四节 电阻温度计的应用.....	94
第五节 玻璃温度计.....	98
第二章 压力与速度的测量	102
✓ 第一节 压力指示仪表.....	102
第二节 气流压力和速度的测量.....	112
第三节 其它问题.....	131
第三章 液体和气体的流量测量	134
第一节 用风速管测量流量.....	134
第二节 节流式流量计.....	13
第三节 其他流量计.....	16
第四章 误差分析	17
第一节 误差表示方法.....	176
第二节 误差的来源、性质和消除办法.....	177
第三节 误差的传递.....	183

TK31/1016



2008047806

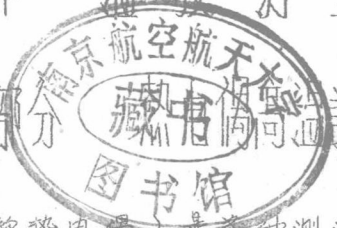
TK31
1016-1

毛主席语录

自然科学是人们争取自由的一种武装。……人们为着要在自然界里得到自由，就利用自然科学来了解自然，克服自然和改造自然，从自然里得到自由。

第一章 温度测量

第一部分 热电阻温度计

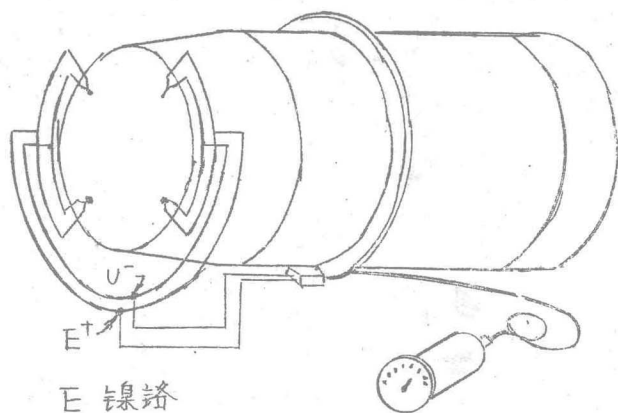


热电阻温度计（简称热电阻）是各种测温技术中，在当前用得最多的一种。它不仅用来测量温度，而且愈来愈多地作温度自动控制之用。在航空发动机的温度测量和温度控制以及在发动机的试验工作中也广泛地使用热电阻。这一部分，我们将对热电阻的原理和应用作初步的介绍，进一步的知识可查阅有关的书籍。

第一节 什么是热电阻

大家知道，在航空发动机尾喷管部分，装有测量涡轮后燃气温度 T_4^* 的热电阻（见图 1-1）。为了弄清热电阻的道理，我们先把热电阻简单地看作是由两种不同材料的金属导线 A 和 B 分别在接点 1 和 2 焊接而成（图 1-2），接点 1 为 0°C （称为冷端），接点 2（称为热端）放在尾喷管内测量燃气温度 T_4^* 。这时由仪表可以测得线路内有电势 E 存在。如果预先用实验方法

2008047806



E 镍铬
U 镍铝

图 1-1 发动机排气温度测量

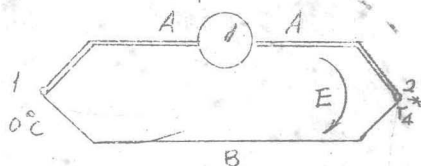


图 1-2 简单热电偶原理图

测出热端温度与电势 E 的函数关系 (冷端仍为 0°C)，我们就可利用这种函数关系从仪表读数 E 而查出温度 T^* 。例如用镍

热端温度 $^{\circ}\text{C}$	.....	600	700	800	900	1000	.....
电势 E [毫伏]	.....	24.90	29.13	33.29	37.33	41.27	.....

铬-镍铝热电偶现成的电势-温度关系 (冷端 0°C) 表格和曲线 (图 1-3) 就可以测量 T^* 。当镍铬-镍铝热电偶测得电势 $E = 36.17$ [毫伏] 时，从图 1-3 就可以查出 $T^* = 870^{\circ}\text{C}$ 。然而在实际上，仪表是直接用温度刻度的，以便使飞行员

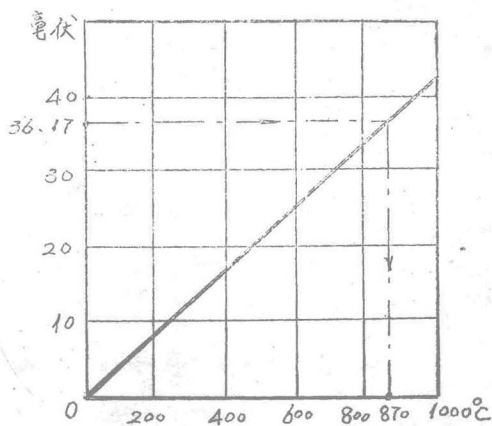


图 3-1 镍铬-镍铝热电偶的热电势-温度关系

直接读出 T_4^* 的数值，不必再去查表。

下面让我们来研究热电偶为什么可以测温？

为了明晰起见，将图 1-2 中的仪表去掉，则热电偶用 A 和 B 表示（图 1-4），它之所以产生电势 E 是因为：

① A 和 B 的材料不同；

② 接点 1 (t_1) 和 2

(t_2) 的温度不同。

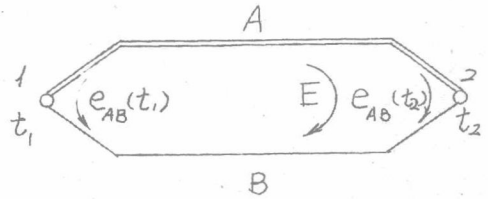


图 1-4 热电偶原理图

毛主席教导我们：“事物发展的根本原因，不在事物的外部而是在事物的内部，在于事物内部的矛盾性。”

进一步的研究表明，在两种不同材料金属的接点处，由于每一种金属内的自由电子都有向另一金属进行扩散的运动。这种自由电子的互相扩散，使得存有较多自由电子的一方将向少的一方移动的趋势，最后就在接点处产生电势，如 e_{AB} ， e_{AB} 的大小则与接点的温度有关。因此，图 1-4 的电势 E 就是接点 1 和 2 两处电势的综合：

$$E = e_{AB}(t_2) - e_{AB}(t_1)$$

这种因接点 1 和 2 存在温差而产生的电势 E 就称为热电势。如图 1-3 就表示镍铬—镍铝热电偶在冷端为 0°C 时热电势 $E(t, 0)$ 与热端温度 t 的关系曲线，我们正是利用这种关系测出了 T_4^* 的数值。

我们再来看之热电偶的性质：即“温差”为零时不产生热电势；A 和 B 为同一材料时即使有“温差”存在也不会产生热电势。毛主席教导我们：“唯物辩证法认为外因是变化的条件，内因是变化的根据，外因通过内因而起作用。”从上可知，热电偶中不同材料形成的接点，是将热能运动形式转化为电能运动形式的“

根据”，是自由电子由一方移向另一方的“内因”，而接点处的温度则是形成这种转化的“条件”，是“外因”。在热电偶两接点处存在温差，就产生热电势，所以“温差”是产生热电势的条件。如果两接点具有相同的温度，温差为零，很明显就不产生热电势，因为两接点处都产生相同的电势 $e_{AB}(t)$ ，其大小相等、方向相反，所以热电势为零：

$$E = e_{AB}(t) - e_{AB}(t) = 0$$

这就是说：当温差为零时热电势也等于零。

同样，如果A和B的材料相同，即使接点1和2存在温差，在接点处虽然也存在自由电子互相打散的运动，但是两方的打散率相同，因此电势 $e_{AB}(t) = 0$ ，即不产生电势 e_{AB} 。这样也使得热电势E等于零。

综上所述：热电偶因两接点处有温差而产生热电势，温差为零，热电势亦为零；然而温差不能使单一材料的回路产生热电势，因为这两者的“根据”是不同的。

为了方便起见，我们将图1-2中的仪表看作是加在热电偶线路中的第三种材料C。在图1-5中示出了两种接入C的方法，即(a)和(b)。显然，不论那一种接法都增加了线路的接点，而每个接点又都产生电势，这样，就使得线路的热电势不同于基本热电偶的热电势，这岂不是使问题复杂化了吗？是这样。一般讲，凡是加入了第三种材料C就会改变基本热电偶的性质。但是，在特殊条件下，可以使C的加入并不改变基本热电偶的性质，这个条件就是要保证在第三种材料C两端的接点处应具有相同的温度。让我们看以下的事实。

在图1-5(a)中，C接在A之中形成接点3和3'，并都有相同温度 t_3 。这时在3和3'处均有电势产生，由于都在温度 t_3 ，所以3处电势 $e_{AC}(t_3)$ 和3'处电势 $e_{CA}(t_3)$ 两

者的大小相等、方向相反，彼此抵消。因此，只要接点 3 和 3' 的温度相同，C 的加入并未改变基本热电偶的性质。

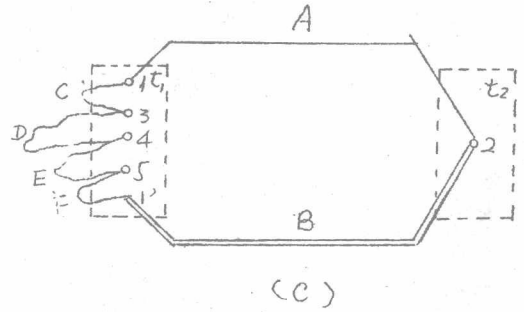
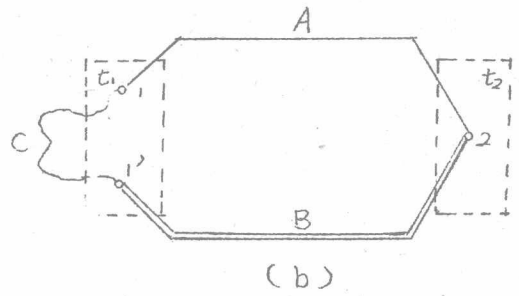
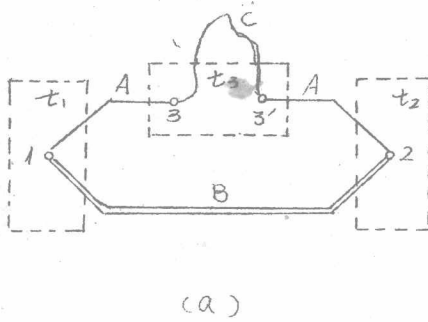
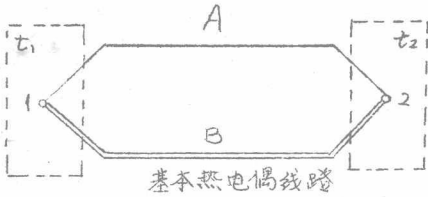


图 1-5 有三种材料时热电偶的线路

(a) 第三种材料 C 接在 A 的中间

(b) 第三种材料 C 分别与 A 和 B 连接

(c) 多种材料 C, D, E, F 与 A 和 B 连接

在图 1-5 (b) 中，C 与 A 和 B 分别在接点 1 和 1' 处相接，并都处在温度 t_1 。前面已经讲过，基本热电偶的热电势为

$$E_{(基)} = e_{AB}(t_2) - e_{AB}(t_1)$$

而图 1-5 (b) 线路的热电势为

$$E_{(b)} = e_{AB}(t_2) - [e_{AC}(t_1) - e_{BC}(t_1)]$$

可以证明：

$$\left[e_{AC}(t_1) - e_{BC}(t_1) \right] = e_{AB}(t_1)$$

因为，当接点 1、1' 和 2 均处在温度 t_1 时，线路热电势 $E'_{(b)}$ 等于零，则

$$E'_{(b)} = e_{AB}(t_1) - \left[e_{AC}(t_1) - e_{BC}(t_1) \right] = 0$$

$$\therefore \left[e_{AC}(t_1) - e_{BC}(t_1) \right] = e_{AB}(t_1)$$

由此，只要接点 1 和 1' 处在相同温度 t_1 ，则可得

$$E_{(b)} = e_{AB}(t_2) - e_{AB}(t_1) = E_{(基)}$$

即 $E_{(b)}$ 与基本热电偶的热电势一样，也就是说在接点 1 和 1' 都有相同的温度时，C 的加入并不改变基本热电偶的性质。

我们还可以进一步设想，在热电偶线路中不仅加入第三种材料，而且还加入了第四种、第五种、……等多种材料（图 1-5 (c)），这时可以用图 1-5 (b) 的原理证明，只要这些材料接点都处在同一温度，在这条件下仍然不会改变基本热电偶的性质。

由上所说可以得出结论：将仪表接入热电偶线路时，不论是图 1-5 (a) 或 (b) 的接法，只要保证在仪表的两只接线柱有相同的温度，就不会影响热电偶的性质。当然，破坏了上述条件，即两接线柱的温度不相同时，必然要引起测量的误差，因为这时热电偶线路的性质起了变化。我们在使用仪表时应该加以防止。

第二节 热电偶材料

毛主席教导我们：“任何地方必须十分爱惜人力物力，决不可只顾一时，滥用浪费。”在我们根据测温范围选用热电偶材料时，应遵照毛主席这一教导，既要使用可靠，又要经济。

原则上虽然不同材料的两种金属都可以构成热电偶，但长期实践表明只有少数几种金属的组合适于作热电偶。在下表中列出了工业上常用的几种热电偶材料，表中热电偶名称的第一种为正极性，第二种为负极性。

名称	符号		热电极成分		测温上限[°C]		t ₂ = 100°C t ₁ = 0°C时的 热电势[毫伏]	价 格
	现在 使用	参考	+	-	长期 使用	短期 使用		
铂铑-铂	LB	ΠΠ	Rh10%+Pt90%	Pt100%	1300	1800	0.64	贵
镍铬-镍硅	EU ₂	XA	Ni90%+Cr10%	Ni97%+Si3%	1000	1300	4.10	廉
镍铬-镍铝			Ni90%+Cr10%	Ni85%+5% (Al, Si, Mn)				
镍铬-考铜	EA ₂	XK	Ni90%+Cr10%	Cu54%+Ni44%	800	800	6.95	廉

现在分别介绍这几种热电偶材料。

1. 铂铑-铂 (L3) 铂和铑都是稀少的贵金属，价格昂贵，所以这种热电偶称为贵金属热电偶。因为铂铑-铂热电偶能长期维持它的热电性能不变，故多用它作为标准热电偶，用以校验测温热电偶。在测温上限大于 1000°C 时，也用它作测温热电偶。它在氧化性气体中性能稳定，但在还原性气体中很快就被破坏。这种热电偶的缺点是价格昂贵，而且产生的热电势较小，在 1300°C 时大约为 17 毫伏，因此要求应用高灵敏度的测量仪表。

2. 镍铬-镍铝 (EU) 这种热电偶价格较廉，性能较稳定，

复制性好，长期工作为 1000°C ，短期可用于 1300°C 。在工业和航空发动机试验中，广泛用作测温热电偶，它的热电势—温度关系近于直线关系，热电势也比较大。由于这两种热电极中采用了大量的镍，故在高温下抗氧化和抗腐蚀能力较强。但高温时镍铝在还原性气体中极易损坏。

3. 镍铬—考铜 (EA_2) 这种热电偶的价格低廉，它的主要优点是热电势大，但测温上限比镍铬—镍铝的低，长期使用为 600°C ，短期使用为 800°C 。

在附表中列出了以上几种热电偶的热电势—温度关系。这是在冷端温度 $t_1 = 0^{\circ}\text{C}$ 的情况下经实验测定而编制的。应当指出，这些附表列出的热电势—温度关系是由“标准”的热电偶材料得出的，而工业上使用的热电偶材料则存在一定的偏差。下面列出了几种热电偶材料的最大允许误差值。只要热电偶材料合乎这一规定，就可以应用附表列出的“标准”热电势—温度关系。

名称	符号	允许最大误差值	
		$0-300^{\circ}\text{C}$	300°C 以上
铂铑—铂	LB_3	± 0.01 [毫伏]	不大于所测热电势的 $\pm 0.3\%$
镍铬—镍硅 镍铬—镍铝	EU_2	$\pm 4^{\circ}\text{C}$ ($\sim \pm 0.15$ [毫伏])	不大于所测热电势的 $\pm 1\%$
镍铬—考铜	EA_2	$\pm 4^{\circ}\text{C}$ ($\sim \pm 0.2$ [毫伏])	不大于所测热电势的 $\pm 1\%$

解放以来，在伟大领袖毛主席的英明领导下，我国的仪表及材料工业也和其它工业部门一样得到了飞速的发展，从一无所有发展到制造许多精密、高级、尖端的仪器仪表，满足了工业和科研部门的需要。但是叛徒、内奸、工贼刘少奇及其代理人推行一条反革命修正主义路线；宣扬爬行主义和洋奴哲学，干扰毛主席的革命路线。他们不发展国产热电偶材料，每年却花费大量外汇

依赖苏联等国进口铂铑-铂等热电偶材料。1962年苏联社会帝国主义和其它帝国主义对我国实行刁难，封锁，禁止供应包括铂铑-铂热电偶丝等在内的一切关键物资，妄图从经济上、技术上卡我们。但是我国广大工人和革命技术人员，高举毛泽东思想伟大红旗，自力更生，奋发图强，于1964年已小批生产铂铑-铂热电偶丝，1967年已稳定生产。目前我国生产的铂铑-铂热电偶丝，不仅在质量上赶上了国际先进水平，而且在数量上也满足了工业部门和计量部门的需要。此外，从1963年以来，我国采用先进的冶炼技术，用镍硅合金代替镍钴合金，使热电偶材料的生产水平大为提高。我们知道，镍钴-镍铂热电偶是贵金属热电偶中性能最好、用途最广的一种。它的热电势大，线性好，测量范围较高。然而实验表明，镍钴-镍铂热电偶长久使用后热电势发生变化的原因是镍铂丝易于氧化所致。而新的镍硅合金的热电性能完全与镍铂丝的相同，镍硅合金无论在抗氧化性还是在热电势稳定性方面都显著地优于镍铂丝。所以目前在很多场合已由镍钴-镍硅热电偶代替了镍钴-镍铂热电偶。更令人兴奋的是上海的工人阶级，在党的“九大”方针、胜利路线的指引下，进一步发扬独立自主，自力更生的革命精神，开展大协作，于1971年试制成功一种新的金属材料来代替铂铑-铂热电偶丝，这不仅节省了稀缺的贵重金属材料，大大降低成本，而且也为我国仪表材料工业闯出了一条新路。这是无产阶级文化大革命的胜利，是毛泽东思想的又一伟大胜利！

现在介绍一下补偿导线。

本来，热电偶直接与仪表连接即可测得热电势，然而在实际

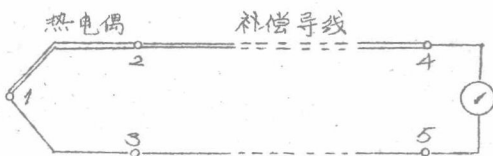


图1-6 有补偿导线的热电偶线路

工作中，测温地线与仪表之间距离比较大时，常常用“补偿导线”将热电偶和仪表连接起来

(参 1—3)，以节省热电偶材料，例如，铂铑—铂热电偶就是用铜—铜镍合金来作补偿导线的，镍铬—镍铝热电偶以及镍铬—考铜热电偶虽然仍然用相同的材料作补偿导线，然而利用检验热电偶材料时剔出的次品加工而成。

热电偶测温时，仅热接点部分处在高温环境，而其余部分的温度则是不高的。这样，利用价格便宜的、在 $0-100^{\circ}\text{C}$ 范围内热电性能和热电偶的热电性能一致的补偿导线作连接导线，就可以节省价格较贵的热电偶材料而又不会改变热电偶原来的热电性能。加入补偿导线的作用，实质上就是把热电偶的冷端延长而已。

下面列出几种常用的补偿导线。

配用热电偶	线芯材料和绝缘层颜色		热电势 [毫伏] 热端 100°C ，冷端 0°C
	正 极	反 极	
铂铑—铂	铜 (红色)	99.4% 铜 + 0.6% 镍 (绿色)	0.64 ± 0.03
镍铬—镍铝	铜 (红色)	镍钢 (肉桂色)	4.16 ± 0.15
镍铬—考铜	镍铬 (紫色)	考铜 (黄色)	6.95 ± 0.3

由于补偿导线的热电性能不能准确地与所配接的热电偶的热电性能相一致，因而补偿导线总会给热电偶线路带来一定的误差。另外，热电偶与补偿导线相配接时要按相反的极性相配接，不可配错，而且配接处 (参 1—3 中的 2 与 3 处) 的温度不能超过 100°C ，否则将引起很大误差。

毛主席教导我们：“在斗争、实践和科学实验范围内，人类总是不断发展的，自然界也总是不断发展的，永远不会停止在一个水平上。”随着科学技术的发展，热电偶的材料也是不断改进的，如新发展的镍铬—镍硅热电偶已逐渐取代镍铬—镍铝热电偶，它

们之间的热电势-温度关系是完全一致的，但前者在抗氧化和耐腐蚀性能方面均比镍铬-镍铝热电偶有所改进。此外，在提高热电偶测温上限方面也出现许多新材料，如铂30铑-铂。铑热电偶的测温上限为1600°C，短期使用可达1800°C等等。

由于在航空工业，原子能等方面对热电偶提出的小型化，长寿命等要求，近年来出现了一种“套管热电偶”（图1-7），它是由热电偶丝、绝缘材料以及金属套管三位一体，经过拉伸或旋锻而成。使用时截取所需长度，一端将热电偶丝剥离出来熔焊而成热接点，另一端用冷端套筒接出引线后即可使用。

套管热电偶的特点是尺寸小（套管外径最细可达Φ0.25毫米），热惯性小；可以任意弯曲，能安装到曲折狭小的测温部位；机械强度高，能耐震、耐冲击等。由于这些特点，它已得到愈来愈多

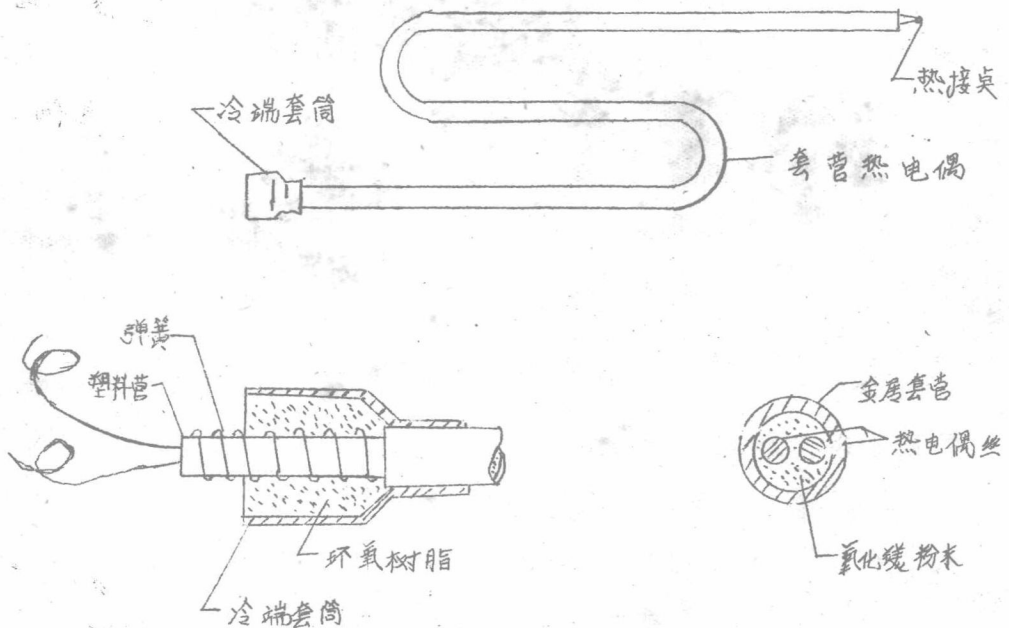


图 1-7 套管热电偶

的应用。在无产阶级文化大革命中，我国工人阶级在毛主席“自

力更生”、“奋发图强”的精神指引下，迅速研制成功这种新型热电偶，为社会主义建设作出了新贡献。

毛主席语录

抓革命，促生产，促工作，促战备。

第三节 热电偶制作的基本知识

由于测温对象不同，热电偶的构造也不同，尤其是实验工作本身所具有的特殊性，一般都要根据具体情况自行制作热电偶。所以我们不但要求能掌握热电偶的使用，而且在必要时还能自己动手制作合用的热电偶。在这一节我们简单介绍制作热电偶的基本知识，主要讲热电偶的基本结构，热接点焊接、热电偶的检验等三部分，至于热电偶的具体结构，例如气流测温热电偶，将在“气流温度测量”一节里再介绍。

3-1 热电偶的基本结构

测量高温的热电偶要满足以下要求。

1. 在测温上限能可靠地工作。
2. 有足够的机械强度，耐震、耐热冲击。
3. 有足够的电绝缘强度。

为满足这些要求，应采用适当的热电偶材料，绝缘材料和外壳材料，并采用合理的工艺，以保证热电偶工作的可靠性。

例如图 1-8 所示的 797 发动机排气热电偶，它承受高温燃气冲刷的热接头部分，由于工作条件恶劣，所以用耐热钢作外壳，用高温双孔陶瓷管作热电极的绝缘，并在热电极—陶瓷管—外壳三者之间填充耐热水泥，使三者之间没有间隙，以保证热电偶的密封性和提高承受振动的性能。在其余的温度较低的部分，就米用耐热塑料作热电极的绝缘物都行了。在热电偶制作过程以及最后的检验，都要检验热电偶的电绝缘。一般，室温下的绝缘不应小于 100 兆欧，在高温工作条件下不应小于 2 兆欧。电绝缘不良时，热电偶易受外界电源漏电的干扰而影响仪表读数。此外，必要时还需进行热电偶的振动、热冲击、耐湿性等项试验。

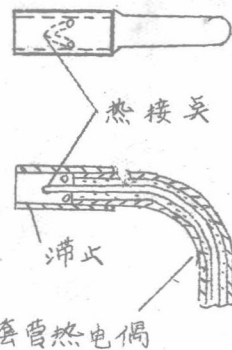


图 1-9 套管热电偶结构

在图 1-9 中示出一种测量高速气流温度用的热电偶，它是直接利用套管热电偶结构再加装滞止屏而成。可以看出，利用套管热电偶这种外壳—绝缘—热电极三位一体的结构，既可使热电偶小型化又使制作工艺大为简化。所以目前套管热电偶已得到广泛的应用。

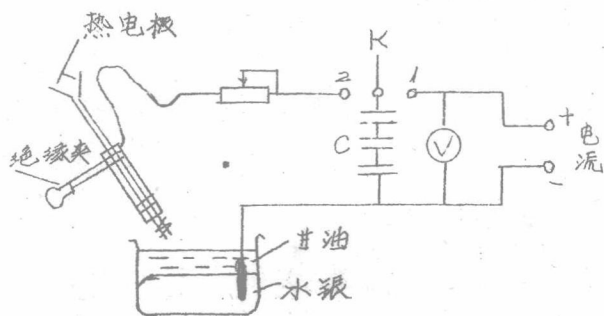
以上所说，我们主要是采用各种适当的外壳—绝缘—热电极三者的组合以满足各种具体测温条件的要求。至于进一步有关绝缘、密封、安装等问题就不再赘述了。

3-2 热接点的焊接

热接点一般都是用焊接方法形成的。原则上讲，只要两热电极的接点对能保证良好的电接触，接点的温度均匀，则接点的焊接方法是不影响热电势的。然而接点的焊接质量会影响使用寿命。因此就要求接点的表面光滑，无氧化皮，无裂纹、夹渣等。热接点的焊接方法很多，有专用的焊接设备，下面介绍常用的几种方法，在没有专用焊接设备时可以因地制宜地利用一些简单设备自制焊接工具。

① 水银焊接法。

水银焊接法适于焊接 $\phi 0.5$ 毫米以下的热电偶丝。这种方法的优点是焊接质量好，设备简单，可以自制。如查1—10所示，事先经过磨光的一对热电极，将两端头靠紧后固定在绝缘夹上，然后利用热电极端头与水银接触时电容C放电的电弧而使两端头熔成接点的。焊接前先将开关K放在位置1，直流电流对电容C充电，电流电压U和电容C都可以改变，使电容C储存电能 $\frac{CU^2}{2}$ 。



查1-10 水银焊接设备

然后，K放在位置2，将绝缘头投入水银槽中，使两端头与水银接触，于是电容C放电，形成放电电弧，而将两端头熔成接头，即完成焊接过程。这种方法的关键是电容C储存的能量 $\frac{CU^2}{2}$ 要适当，如果C小或U较低，则电能 $\frac{CU^2}{2}$ 就不足以使两端头熔成接头。反之，如果C大或U过高，则电能 $\frac{CU^2}{2}$ 过大反而使接头烧毁。

适当地调整电能 $\frac{CU^2}{2}$ ，即调整电容C及电压U，就可以获得光泽、圆滑的接头。应该注意，水银槽中的水银蒸汽对人的健康有害，为了防止水银蒸汽逸入大气，在水银面上应复盖一层甘油。

③. 电弧焊接法。

电弧焊接法适于焊接 $\phi 0.5 - 1.5$ 毫米的热电极。焊接前先将一对热电极的端头磨光，去掉氧化层，再用细金属丝将一对热电极的端头束牢。为了防止焊接时的氧化，焊接前还要在这一对热电极端头上复盖保护球。复盖办法是将端头在酒精灯上予热，然后蘸上硼砂和石英砂的混合物，经过这样几次反复就在端头形成

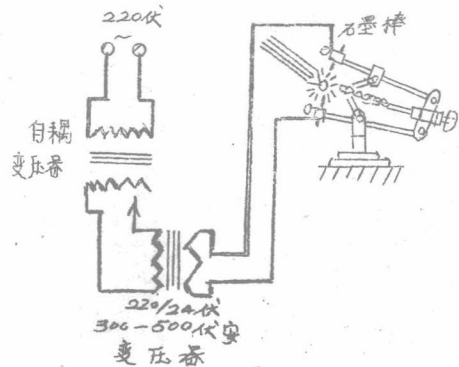


图1-11 热电极焊接的准备

图1-12 电弧焊接设备