



温度的测量

Temperature Measurement





5 温度的测量

5.1 温度的概念

5.2 温标

5.3 温度测量的主要方法

5.4 热电偶测温

5.5 热电偶的应用



5 温度的测量

审堂下之阴，而知日月之行，阴阳之变；见瓶水之冰，而知天下之寒，鱼鳖之藏也。

——《吕氏春秋·慎大览·察今》





5 温度的测量

■ 温度的测量实例一：体温的测量

水银温度计



红外温度计



耳温枪



5 温度的测量

■ 温度的测量实例二：陶瓷加工中炉窑温度的测量



古窑利用当地松柴燃料燃烧温度高、火焰长的特性进行烧制陶瓷



窑工仔细摆放窑体材料，通过精确的炉温测量与控制，能够烧制完美的陶瓷制品



5 温度的测量

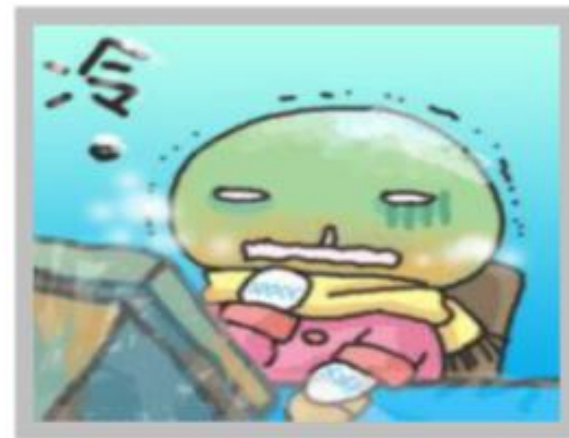
温度是一个很重要的物理量，自然界中任何物理、化学过程都紧密地与温度相联系。在国民经济各部门，如冶金、电力、化工、机械、农业、医学等以及人们的日常生活中，温度检测与控制是十分重要的。





5.1 温度的概念

■ 温度是表征物体冷热程度的物理量

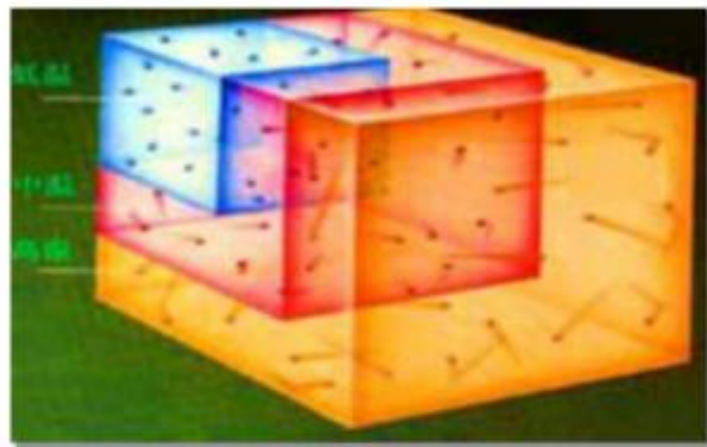
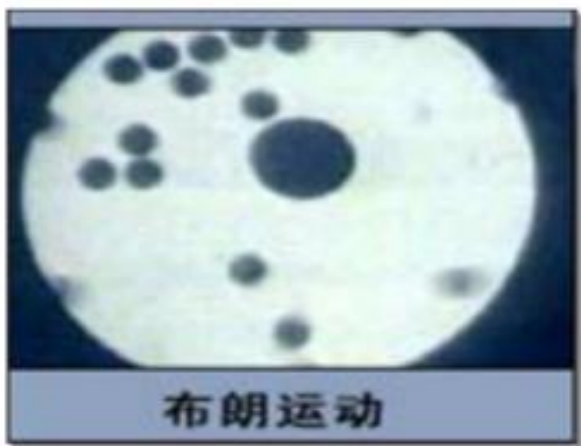




5.1 温度的概念

温度的宏观概念：建立在热平衡基础上的，处于同一**热平衡状态**下的两个物体，就具有某一个共同的物理性质，表征这个物理性质的量就是温度。

温度的微观概念：温度标志着物质内部大量分子的**无规则运动**的剧烈程度。





5.1 温度的概念

温度测量的主要方法及分类

测温方法	传感器类型	测温原理	测温范围 /°C	使用场合
接触式	热膨胀式 固体膨胀式 液体膨胀式	利用液体或固体受热时产生热膨胀的原理	-100 ~ 600	测量轴承、定子等处的温度，输出控制信号或温度越限报警
	压力式 液体式 气体式	利用封闭在固定体积中的气体、液体受热时，其压力变化的性质	0 ~ 300	用于测量易爆、有震动处的温度，传送距离不很远
	热电阻 金属热电阻 半导体热敏电阻	利用导体或半导体受热后电阻值变化的性质	-200 ~ 600	液体、气体、蒸汽的温度，能远距离传送
	热电势 热电偶 P-N结温度计	利用物体的热电性质	-200 ~ 1800	液体、气体、加热炉中的高温，能远距离传送
非接触式	辐射式高温计 光学高温计 辐射高温计 比色高温计	利用物体辐射能的性质	700 ~ 3500	用于测量火焰、钢水等不能进行直接测量的高温场合



5.2 温标

- 温标是温度的数值表示法，即衡量温度的标尺。
- 温标规定了温度的读数起点和基本单位。
 1. 摄氏温标
 2. 华氏温标
 3. 热力学温标
 4. 1990年国际温标（ITS-90）



5.2 温标

1. 摄氏温标

在标准大气压下，水的冰点为 0°C ，水的沸点为 100°C ，中间划分为100等分，每等份为摄氏1度，单位符号为“ $^{\circ}\text{C}$ ”（1742年瑞典科学家A·Celsius 摄尔修斯创立）。

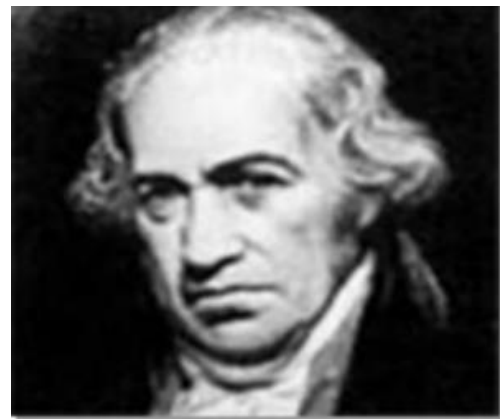




5.2 温标

2. 华氏温标

在标准大气压下，水的冰点为 32°F ，水的沸点为 212°F ，中间划分为180等分，每等份为华氏1度，单位符号为“ $^{\circ}\text{F}$ ”（1724年荷兰物理学家G. D. Fahrenheit华伦海特创立）。



$$t_F = 1.8t_C + 32$$

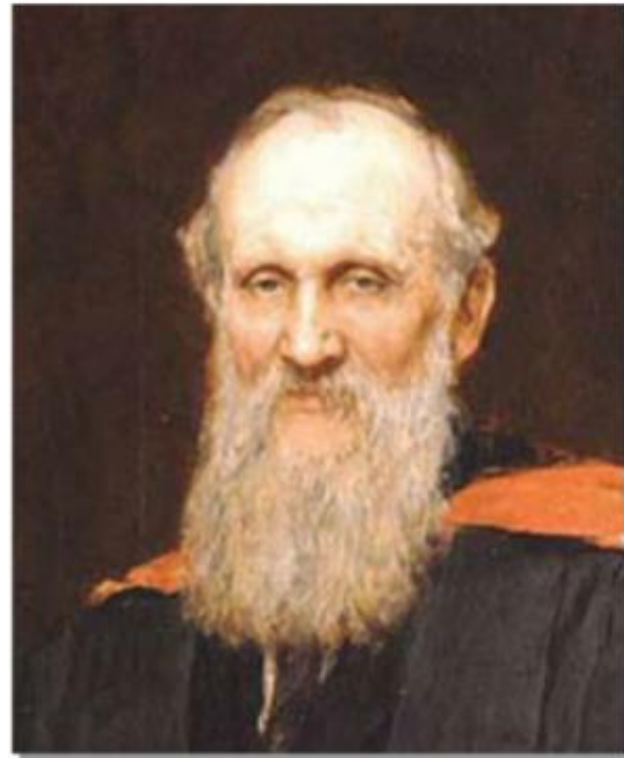
式中 t_C — 摄氏温度（ $^{\circ}\text{C}$ ）， t_F — 华氏温度（ $^{\circ}\text{F}$ ）



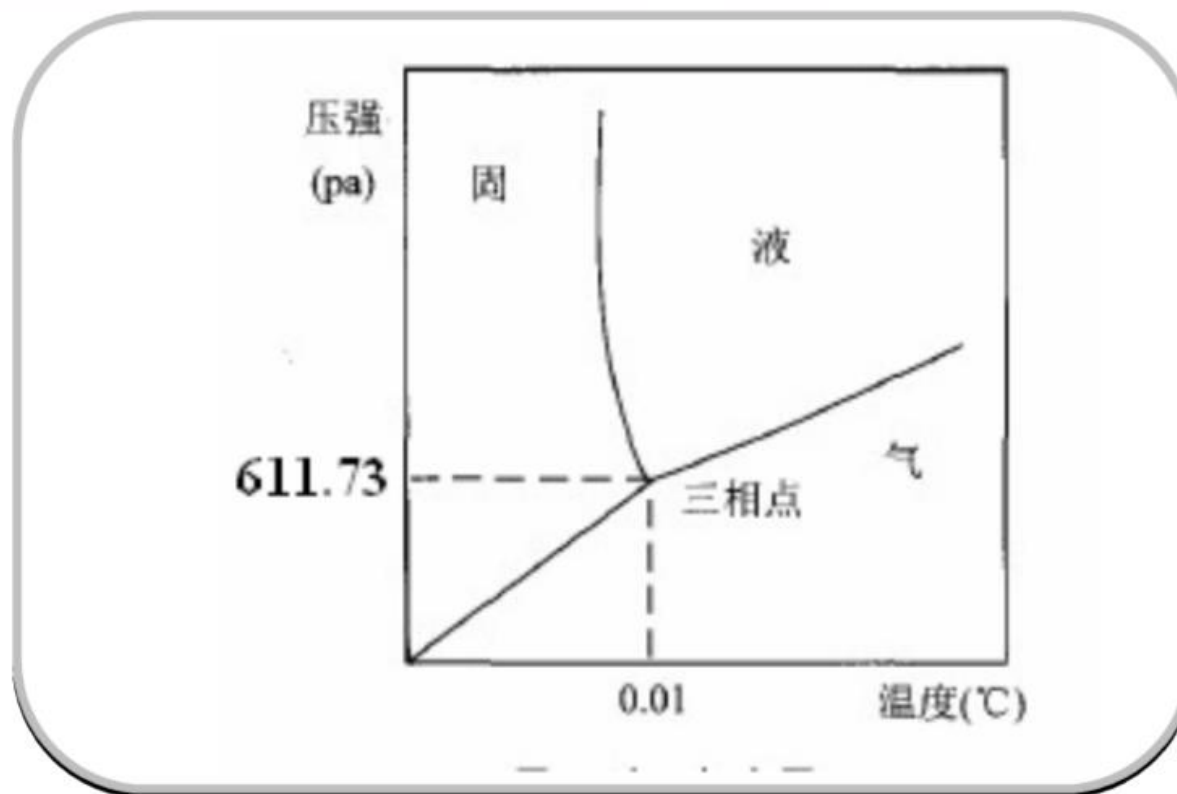
5.2 温标

3. 热力学温标（开尔文温标）

- 1848年英国科学家开尔文根据**热力学第二定律**提出来的。温度代号为 T ，符号为 K 。（Kelvin开尔文）
- 规定了**水三相点**的热力学温度，定义该点温度为 $273.16K$ ；规定分子运动停止时的温度为**绝对零度**。
- 世界各国等采用氢（H），氦（He）、氮（N）等实际气体温度计来实现热力学温标。



5.2 温标



- 水的三相点（水的固、液、气三相平衡共存时的温度）



5.2 温标



问题一：高原上
把水烧开的温
度？



问题二：高空中飞机上
的水是不是只烧到六七
十度就所谓的烧开了？



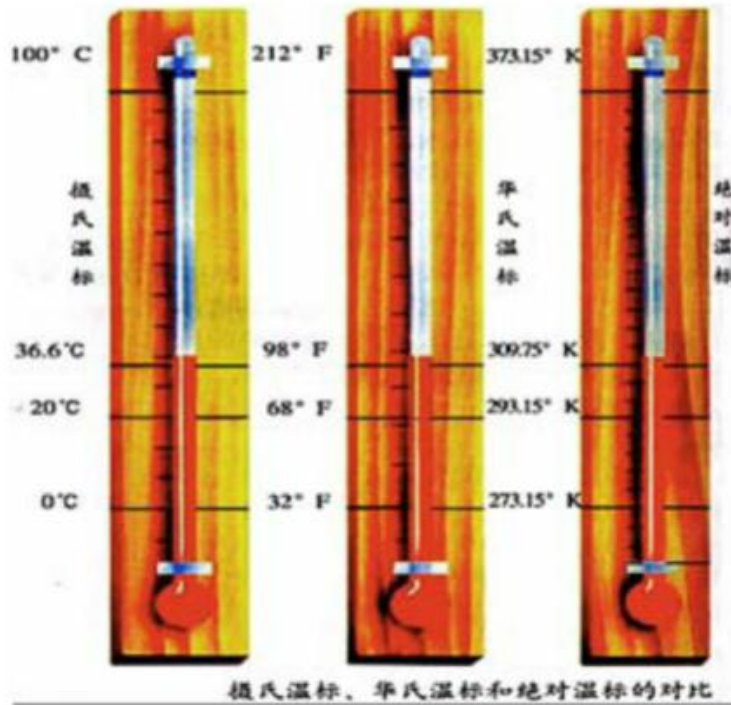
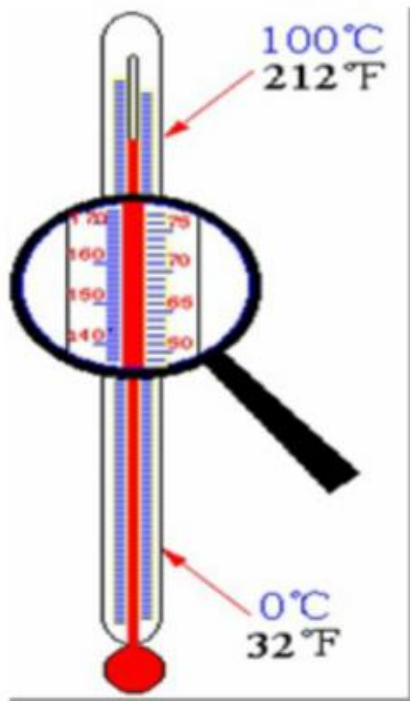
5.2 温标

4. 国际温标ITS-90

- 规定热力学温度（T）的单位用开尔文（K）。
1K等于水处于三相点时温度值的1/273.16。
- 水的三相点定为0.01摄氏度，因此，相应的将绝对零度修正为-273.15摄氏度。
- 摄氏度（t）： $t_{90} = T_{90} - 273.15$
- 规定了四个温区、17个定义固定点及其温度值。

5.2 温标

几种温标的对比



$$T_C = T_K - 273.15$$

$$T_F = 1.8T_C + 32$$



5.3 温度测量的主要方法

温度的测量方法通常分为两大类：

- ◆ 接触式测温
- ◆ 非接触式测温



5.3 温度测量的主要方法

接触式测温

传感器类型	测温原理	测温范围 /°C	使用场合
热膨胀式 固体膨胀式 液体膨胀式	利用液体或固体受热时产生热膨胀的原理	-100 ~ 600	测量轴承、定子等处的温度，输出控制信号或温度超限报警
压力式 液体式 气体式	利用封闭在固定体积中的气体、液体受热时，其压力变化的性质	0 ~ 300	用于测量易爆、有震动处的温度，传送距离不很远
热电阻 金属热电阻 半导体热敏电阻	利用导体或半导体受热后电阻值变化的性质	-200 ~ 600	液体、气体、蒸汽的温度，能远距离传送
热电势 热电偶 P-N结温度计	利用物体的热电性质	-200 ~ 1800	液体、气体、加热炉中的高温，能远距离传送



5.3 温度测量的主要方法

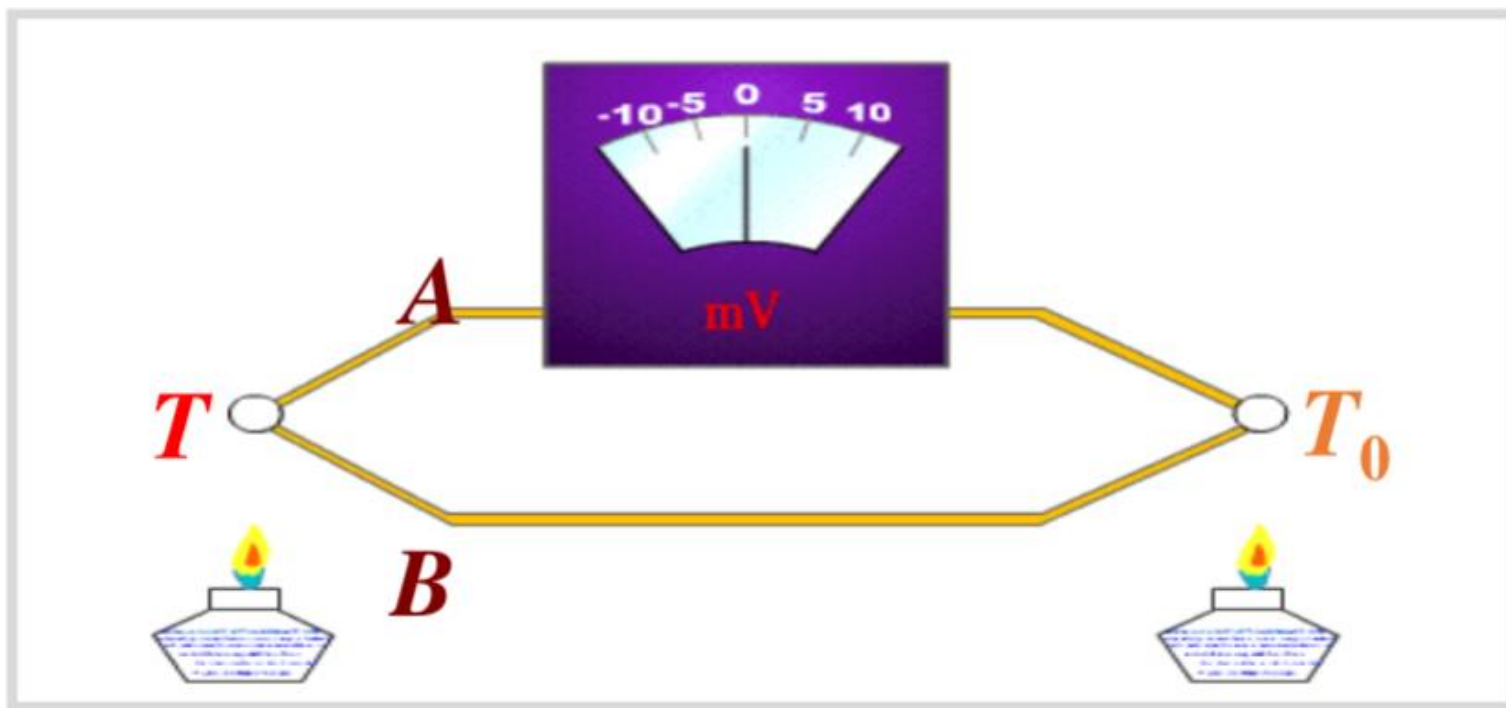
❖ 非接触式测温

测温方法	传感器类型	测温原理	测温范围 /°C	使用场合
非接触式	辐射式高温计 光学高温计 辐射高温计 比色高温计	利用物体辐射能的性质	700 ~ 3500	用于测量火焰、钢水等不能进行直接测量的高温场合



5.4 热电偶测温

一、热电偶的工作原理

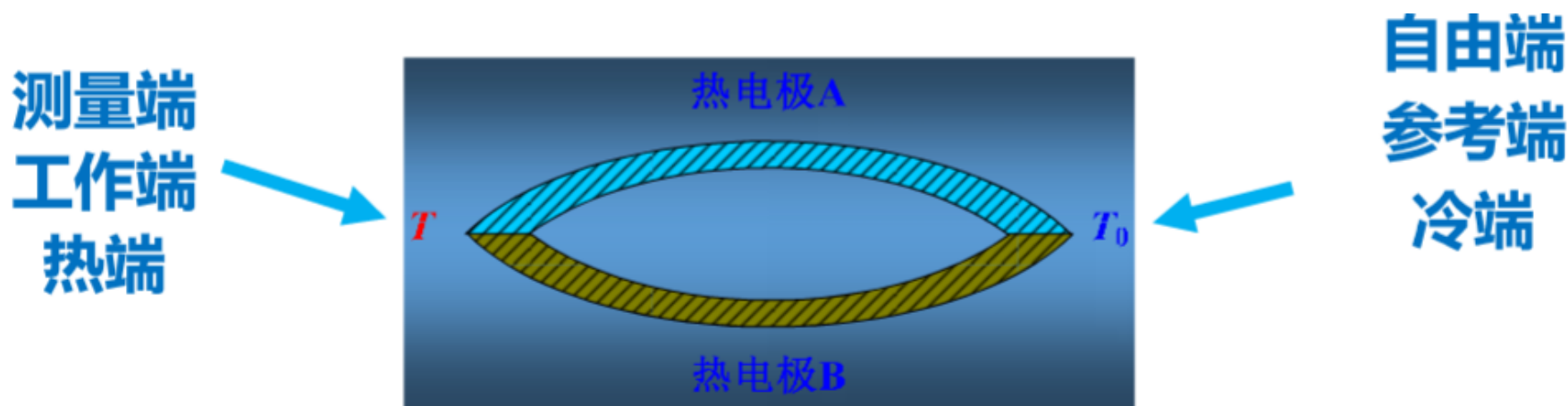


热电偶的工作原理演示



一、热电偶的工作原理

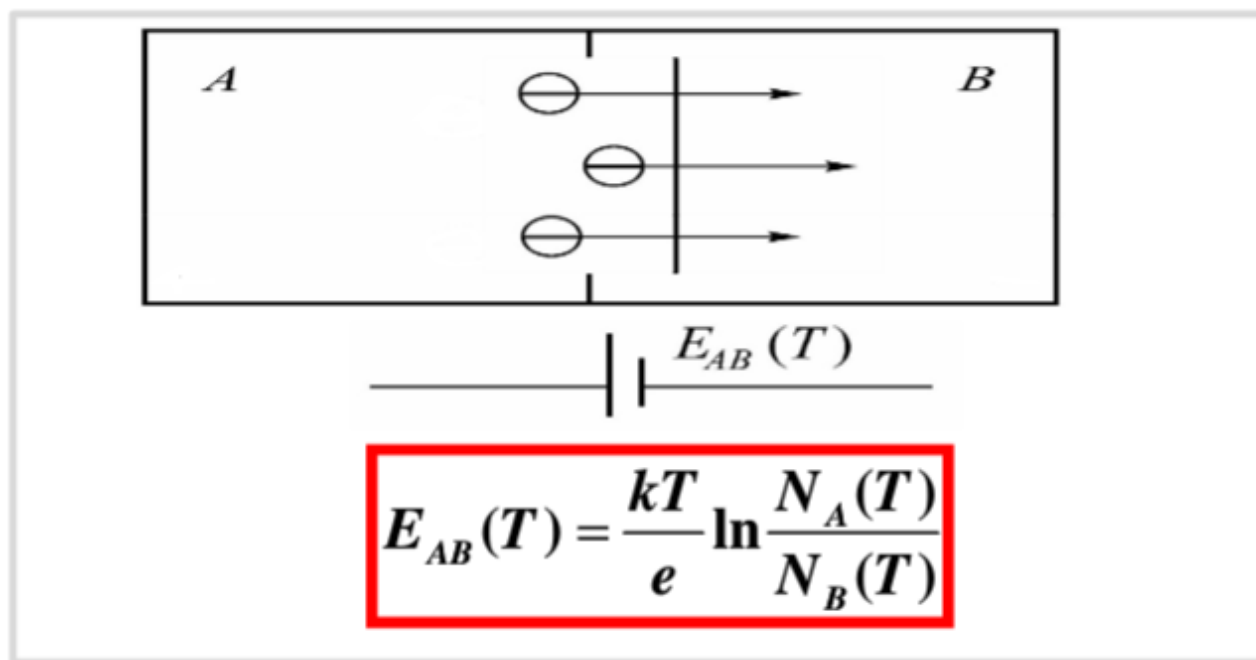
热电效应：两种不同材料的金属导体A和B组成一个闭合回路，当两个结点温度不同时，回路中将产生热电动势，这个物理现象称为热电效应。这个现象是1823年由塞贝克（seebeck）发现的，所以又称为塞贝克效应。





一、热电偶的工作原理

接触电动势（Peltier效应）

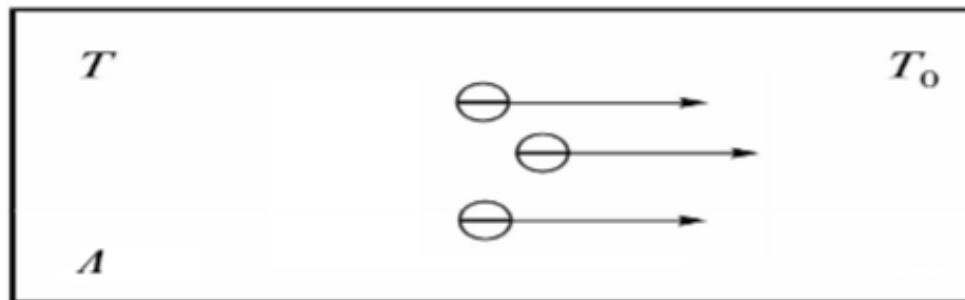


式中： k 为玻尔兹曼常数； e 为电子电荷量； $N_A(t)$ 、 $N_B(t)$ 分别为两种电极材料在温度为 t 时的自由电子体密度。



一、热电偶的工作原理

温差电动势（Thomson效应）



$$- \left| \frac{E_A(T, T_0)}{e} \right|$$

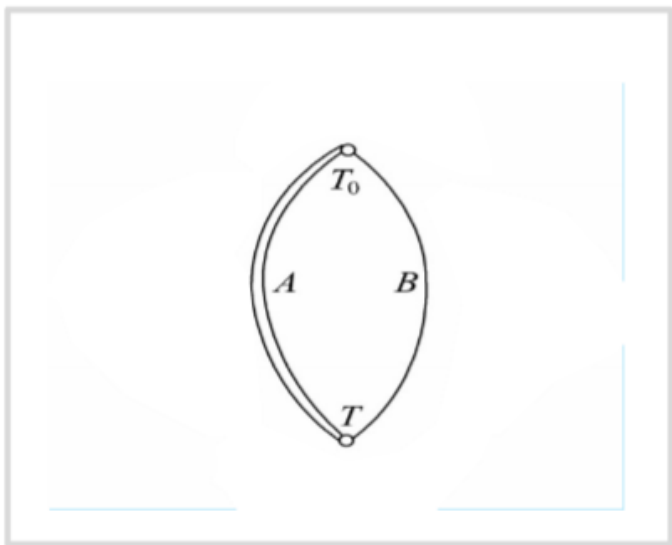
$$E_A(T, T_0) = \frac{k}{e} \int_{T_0}^T \frac{1}{N_A(t)} d(N_A(t) \cdot t)$$

式中： k 为玻尔兹曼常数； e 为电子电荷量； $N_A(t)$ 为电极材料在温度为 t 时的自由电子体密度。



一、热电偶的工作原理

塞贝克效应（热电效应）



$$\begin{aligned} E_{AB}(T, T_0) &= E_{AB}(T) - E_{AB}(T_0) \\ &\quad - E_A(T, T_0) + E_B(T, T_0) \\ &= F(T) - F(T_0) \\ &= \frac{k}{e} \int_{T_0}^T \ln \frac{N_A(t)}{N_B(t)} dt \end{aligned}$$

热电偶产生热电势的两个条件是：1)采用两种不同的材料作为电极；2)热端和冷端两个接触点必须具有不同的温度。



一、热电偶的工作原理

热电偶分度表 (自由端温度为0℃)

附录 E 镍铬-镍硅 K 热电偶分度表 (自由端温度为0℃)

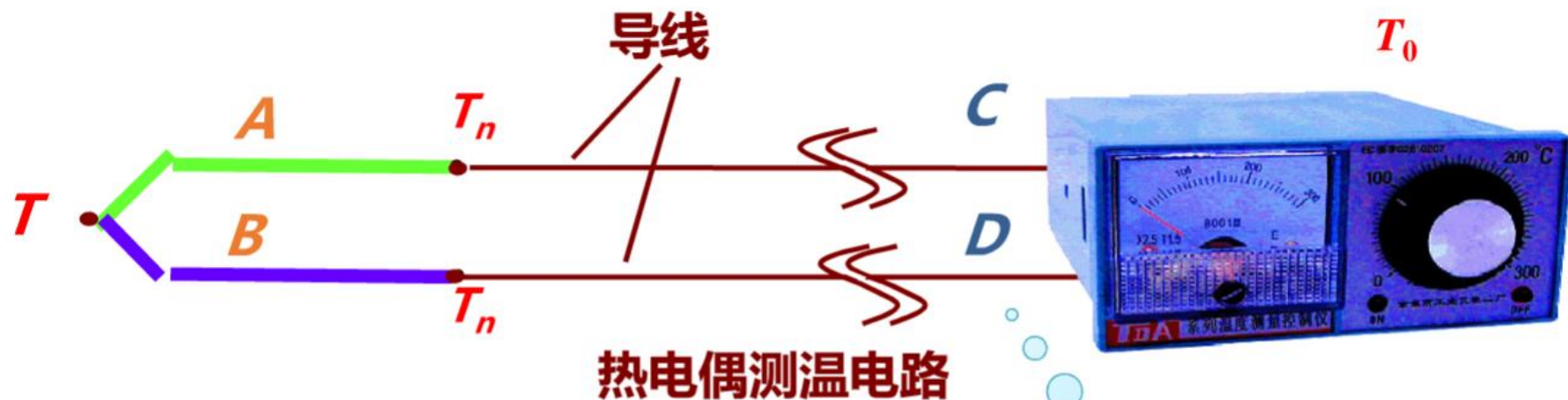
工作端温度/ ℃	热电势/ mV	工作端 温度/ ℃	热电势/ mV	工作端 温度/ ℃	热电势/ mV	工作端 温度/ ℃	热电势/ mV
-270	-6.458	0	0.000	270	10.971	540	22.350
-260	-6.441	10	0.397	280	11.382	550	22.776
-250	-6.404	20	0.798	290	11.795	560	23.203
-240	-6.344	30	1.203	300	12.209	570	23.629
-230	-6.262	40	1.612	310	12.624	580	24.055
-220	-6.158	50	2.023	320	13.040	590	24.480
-210	-6.035	60	2.436	330	13.457	600	24.905
-200	-5.891	70	2.851	340	13.874	610	25.330
-190	-5.730	80	3.267	350	14.293	620	25.755
-180	-5.550	90	3.682	360	14.713	630	26.179
-170	-5.354	100	4.096	370	15.133	640	26.602
-160	-5.141	110	4.509	380	15.554	650	27.025
-150	-4.913	120	4.920	390	15.975	660	27.447
-140	-4.669	130	5.328	400	16.397	670	27.869
-130	-4.411	140	5.735	410	16.820	680	28.289
-120	-4.138	150	6.138	420	17.243	690	28.710
-110	-3.852	160	6.540	430	17.667	700	29.129
-100	-3.554	170	6.941	440	18.091	710	29.548
-90	-3.243	180	7.340	450	18.516	720	29.965
-80	-2.920	190	7.739	460	18.941	730	30.382
-70	-2.587	200	8.138	470	19.366	740	30.798
-60	-2.243	210	8.539	480	19.792	750	31.213
-50	-1.889	220	8.940	490	20.218	760	31.628
-40	-1.527	230	9.343	500	20.644	770	32.041
-30	-1.156	240	9.747	510	21.071	780	32.453
-20	-0.778	250	10.153	520	21.497	790	32.865
-10	-0.392	260	10.561	530	21.924	800	33.275

比较3个值，
热电势-温度关
系是否线性？

灵敏度？



二、热电偶测温的基本定律



实际应用中可能会存在
或注意什么问题？



二、热电偶测温的基本定律

1. 均质导体定律
2. 参考电极定律
3. 中间导体定律
4. 中间温度定律





二、热电偶测温的基本定律

1. 均质导体定律

- 两种**均质**金属组成的热电偶，其热电势大小只与热电极材料和两端温度有关，与几何尺寸及热电极长度上的温度分布无关。
- 若材质**不均匀**则会产生附加电势。
- 由一种材料组成的闭合回路存在温差时，回路如果产生热电势，便说明该材料是不均匀的。可见，该定律为**检查热电极材料均匀性**提供了理论依据。

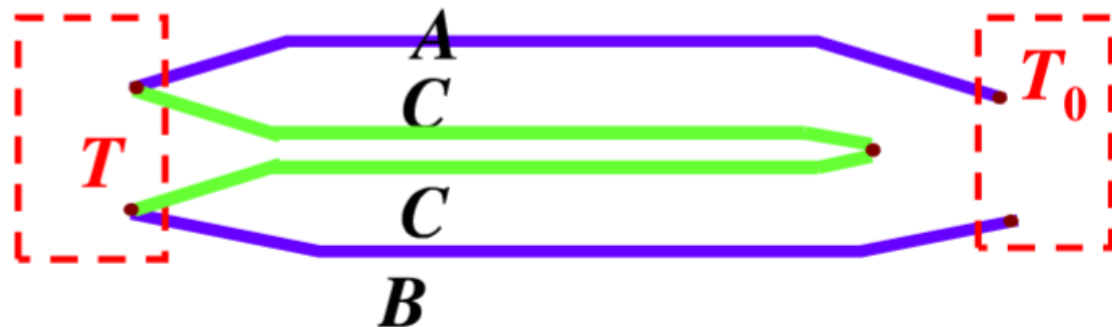


二、热电偶测温的基本定律

2. 参考电极定律

- 两种导体A，B分别与参考电极C（或称标准电极）组成热电偶，则A与B两个热电极配对后组成热电偶的热电势为

$$E_{AB}(T, T_0) = E_{AC}(T, T_0) + E_{CB}(T, T_0)$$

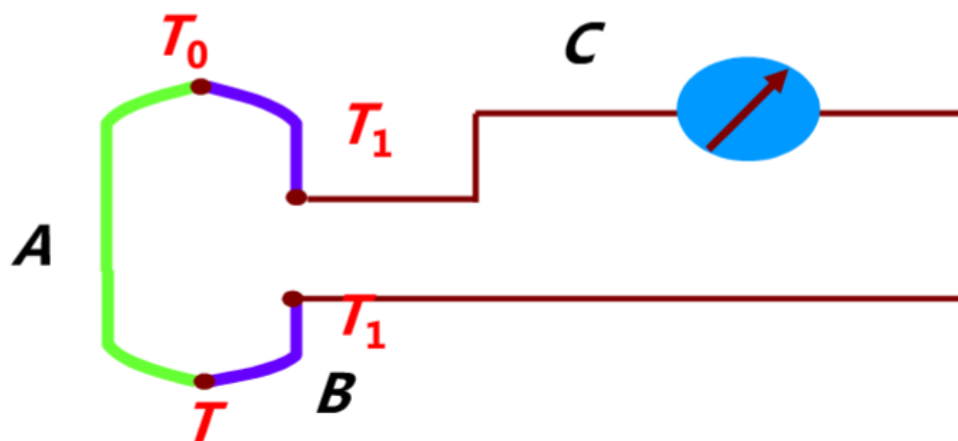
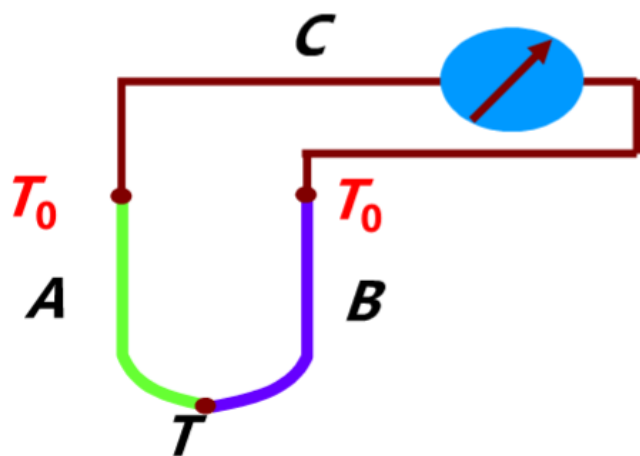




二、热电偶测温的基本定律

3. 中间导体定律

- 在热电偶回路中插入第三种导体，只要插入导体的两端温度相等，且插入导体是均质的，热电偶产生的热电势保持不变。





二、热电偶测温的基本定律

4. 中间温度定律

- 热电偶在结点温度为 (T, T_0) 时的热电动势 $E_{AB}(T, T_0)$ ，等于其在结点温度为 (T, T_n) 与 (T_n, T_0) 时的热电动势 $E_{AB}(T, T_n)$ 与 $E_{AB}(T_n, T_0)$ 之和。

$$E_{AB}(T, T_n) = E_{AB}(T, T_0) + E_{AB}(T_0, T_n)$$

$$E_{AB}(T, 0) = E_{AB}(T, T_0) + E_{AB}(T_0, 0)$$

冷端温度为 0°C ，
热端温度为 T 时的
热电势

冷端温度为 T_0 ，
热端温度为 T 时
热电势

冷端温度为 0°C ，
热端温度为 T_0 的热
电势



三、热电偶冷端温度及其补偿

■ 问题引出

在热电偶的分度表中的热电势是在冷端温度为 0°C 时测得的。但在工程测量中，冷端温度不是 0°C 且常随环境温度的变化而变化。

■ 解决方法

- 热电势修正法
- 电桥补偿法
- 补偿导线法
- 采用冰点作为冷端温度



三、热电偶冷端温度及其补偿

1. 热电势修正法

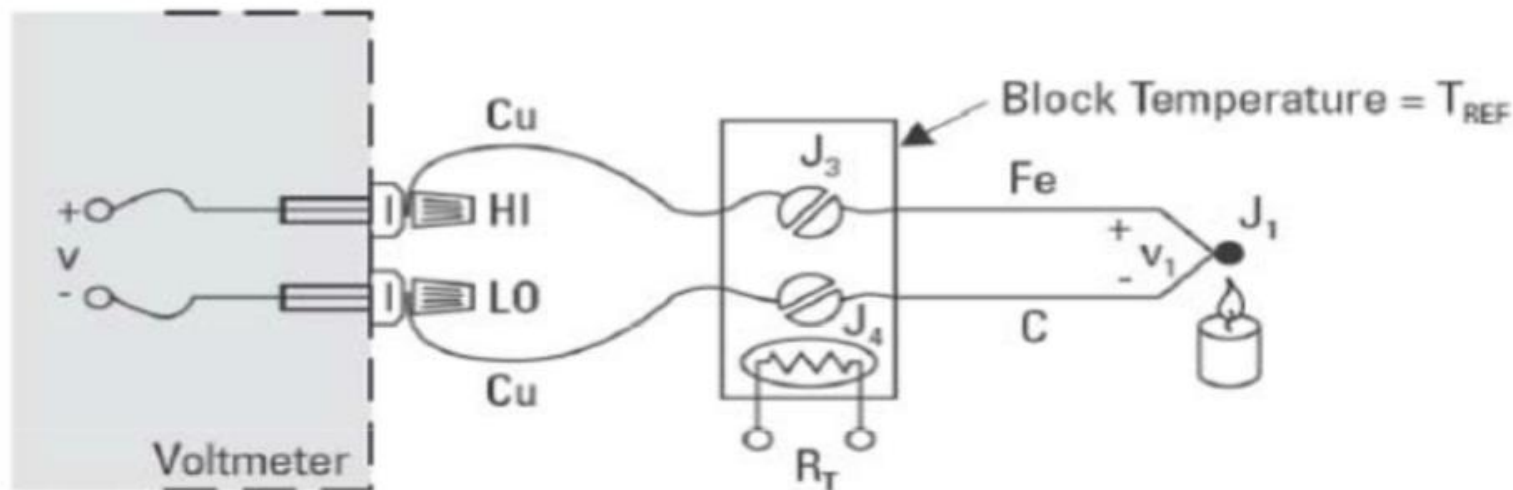
- 设热端温度为 T ，冷端温度为 T_0 ，则可用下式修正：

$$E_{AB}(T, 0) = E_{AB}(T, T_0) + E_{AB}(T_0, 0)$$



三、热电偶冷端温度及其补偿

1. 热电势修正法



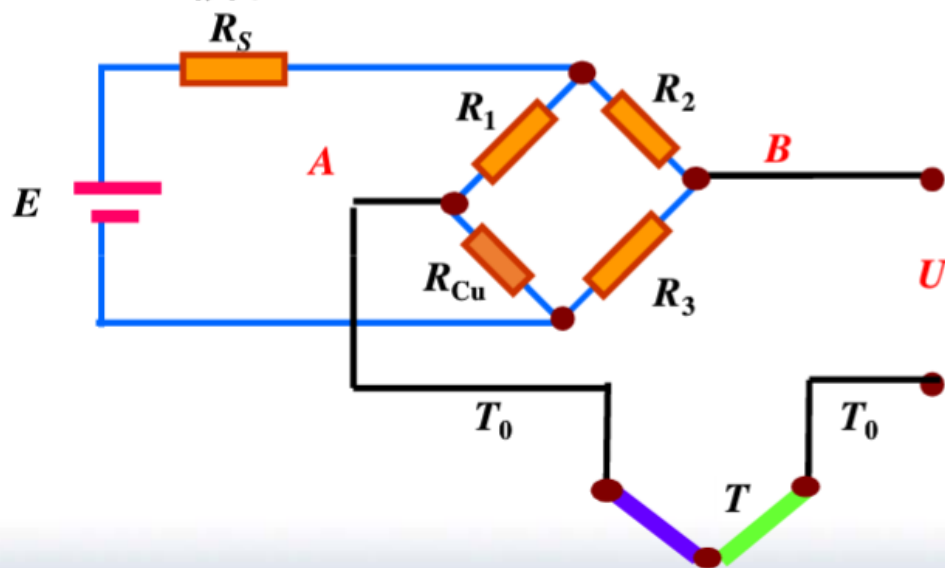
直接测量冷端的温度实现热电势的修正



三、热电偶冷端温度及其补偿

2. 电桥补偿法

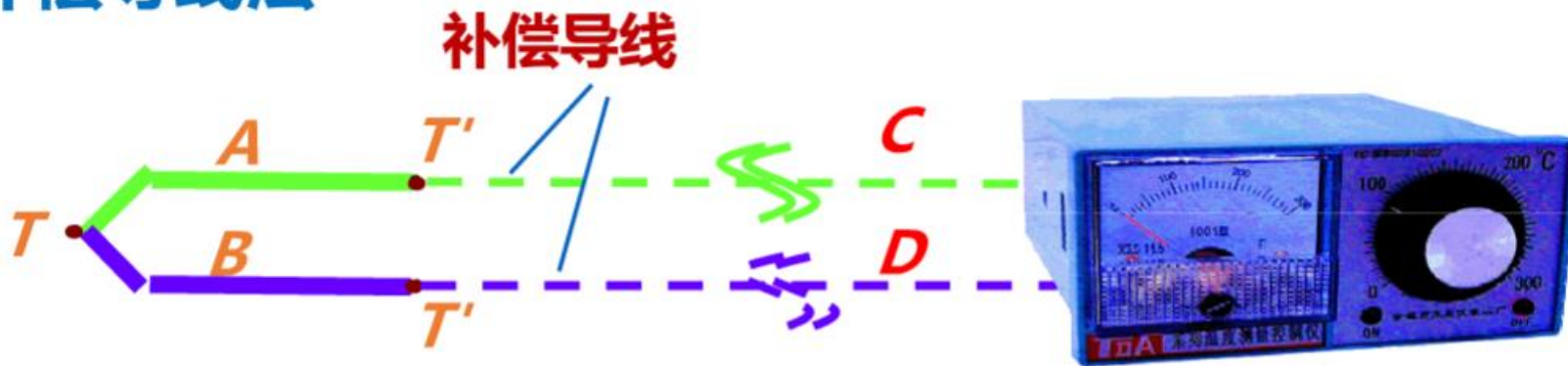
利用不平衡电桥产生的不平衡电压来自动补偿热电偶因冷端温度变化而引起的热电势变化值，可购买与被补偿热电偶对应型号的补偿电桥。



XT-WBC热电偶冷端补偿器

三、热电偶冷端温度及其补偿

3. 补偿导线法

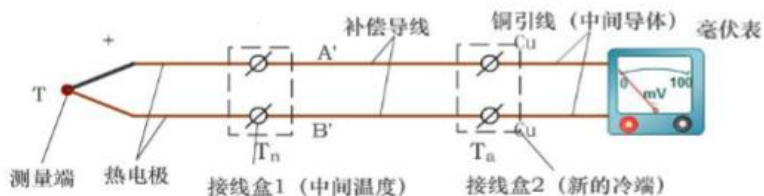
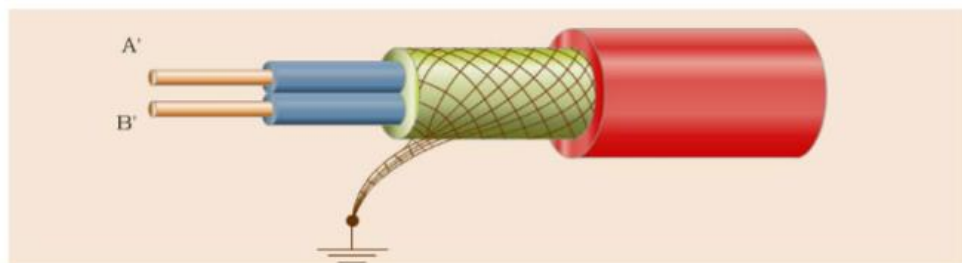


- 不同型号的热电偶必须选用相应的补偿导线；
- 补偿导线和热电偶连接处两结点的温度必须相等，而且不可超过规定温度范围（一般为0~100°C）；
- 采用冷端延长线只是移动了冷结点的位置，当该处温度不为0°C时，仍须进行冷端温度补偿。



三、热电偶冷端温度及其补偿

3. 补偿导线法



热电偶补偿导线的外型图

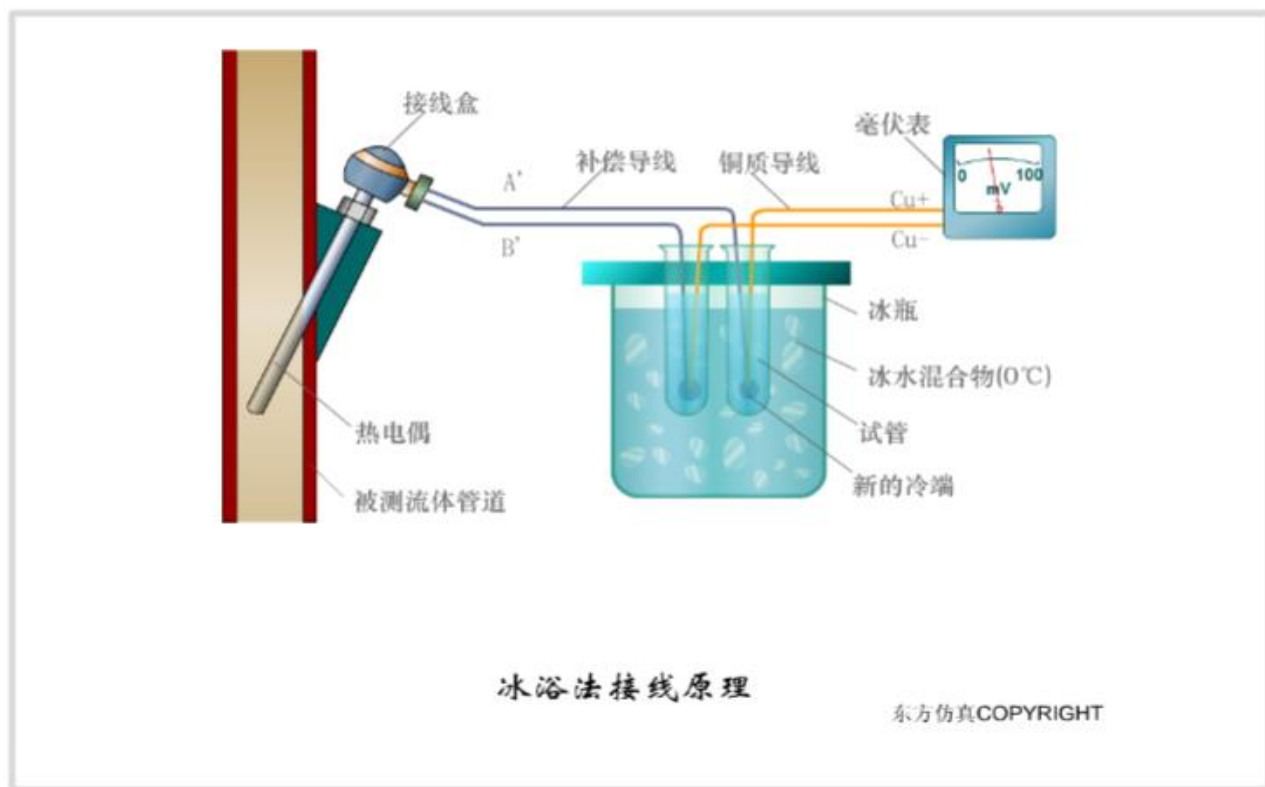
东方仿真COPYRIGHT





三、热电偶冷端温度及其补偿

4. 采用冰点作为冷端温度





四、热电偶的材料、类型及结构

热电偶的材料

用作热电偶材料的基本要求是：

- **测量范围广**。要求在规定的温度测量范围内有较高的测量精确度。
- **精度高**。输出的热电动势较大，灵敏度高。温度与热电动势的关系是单值函数，最好是呈线性关系，重复性好。
- **性能稳定**。有良好的导电性和抗氧化性能；熔点要足够高；机械强度高。

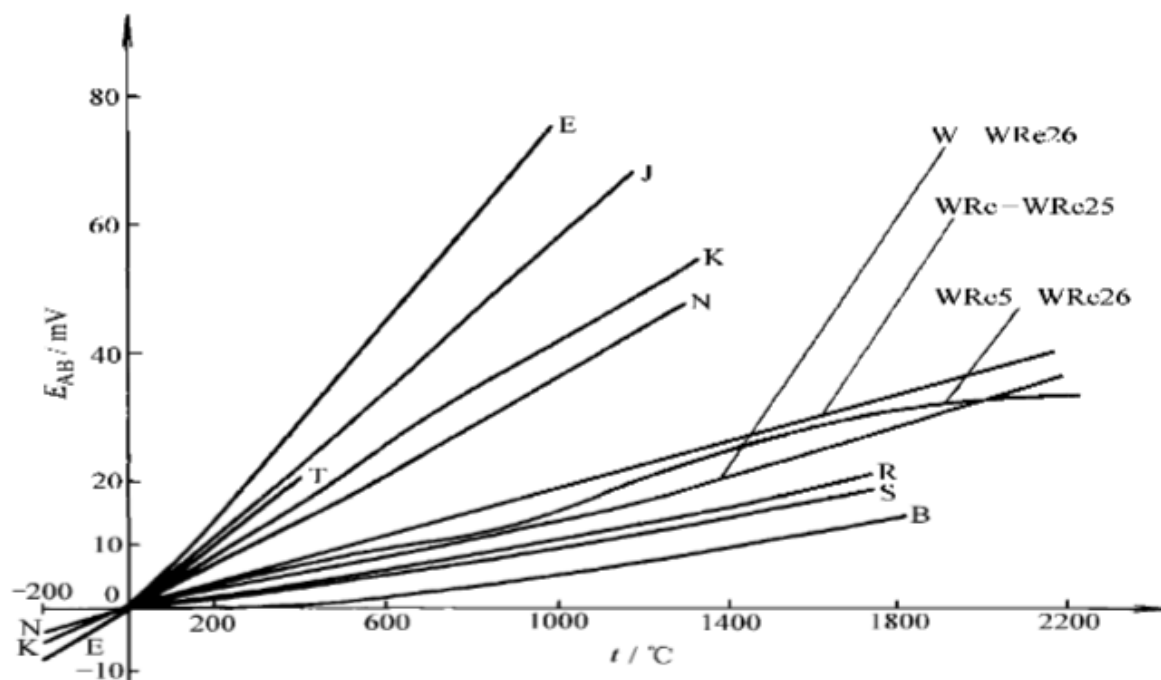
满足上述条件的热电偶材料并不很多。我国把性能符合专业标准或国家标准并具有**统一分度表**的热电偶材料称为**定型热电偶材料**。



四、热电偶的材料、类型及结构

热电偶的材料

- S型(铂铑₁₀-铂)
- R型(铂铑₁₃-铂)
- B型(铂铑₃₀-铂铑₆)
- K型(镍铬-镍硅)
- N型(镍铬硅-镍硅)
- E型(镍铬-康铜)
- J型(铁-康铜)
- T型(铜-康铜)

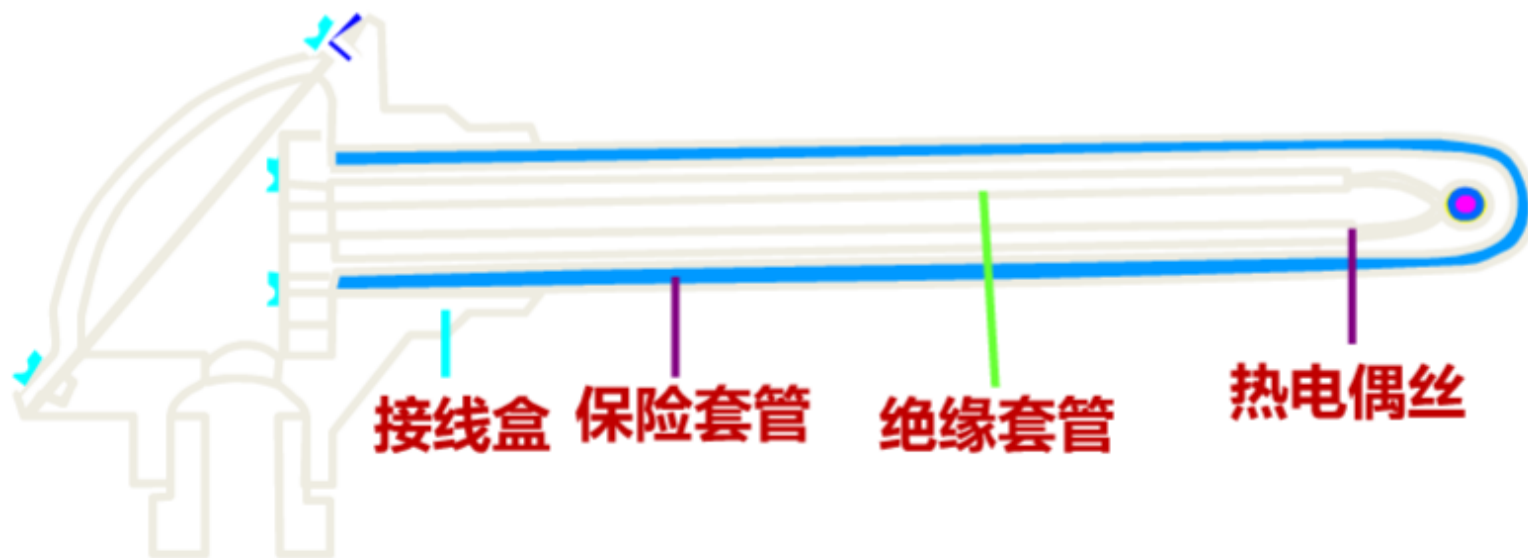




四、热电偶的材料、类型及结构

热电偶的结构形式形式

1. 普通装配型热电偶

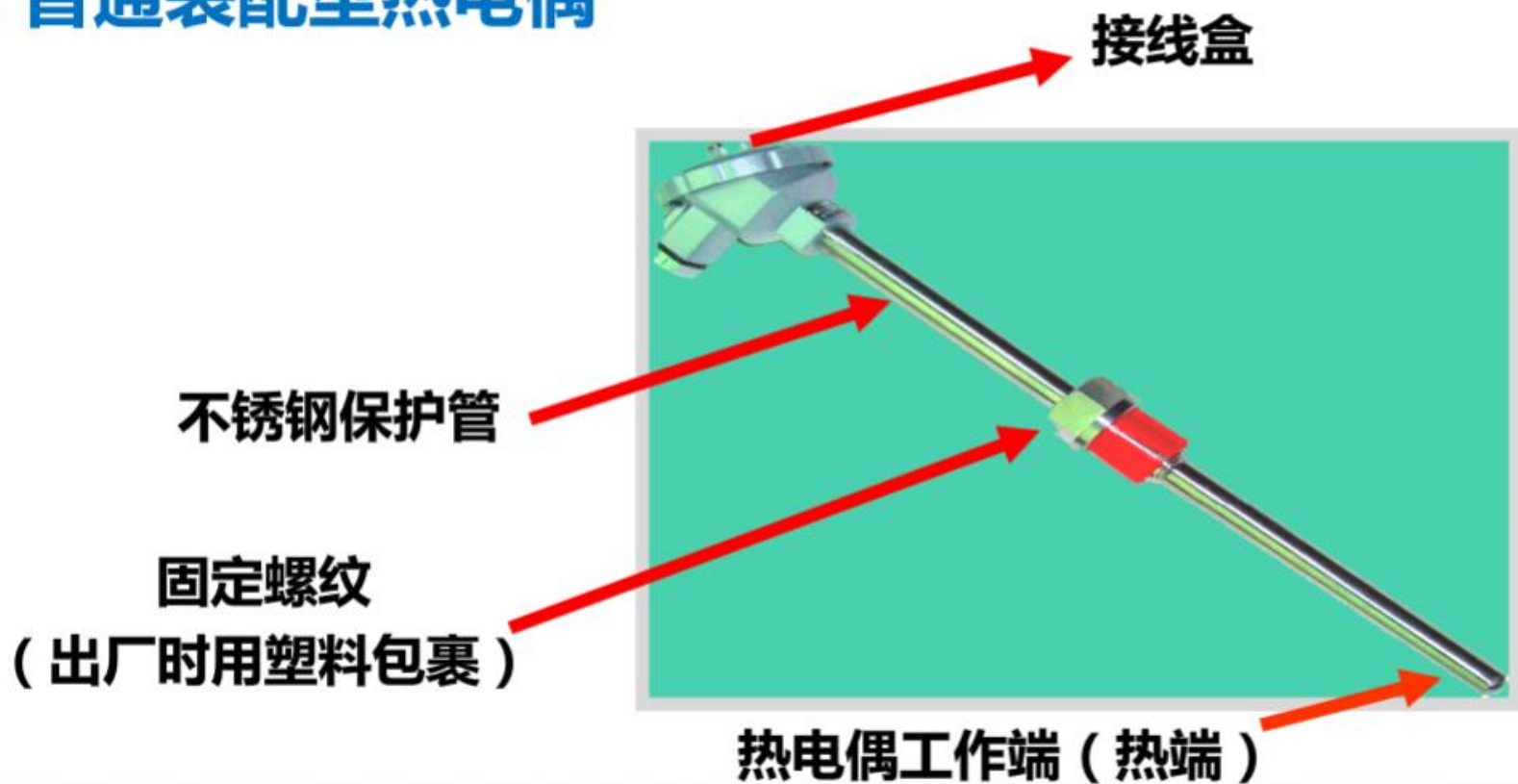


工业用装配式热电偶结构示意图



四、热电偶的材料、类型及结构

1. 普通装配型热电偶





四、热电偶的材料、类型及结构

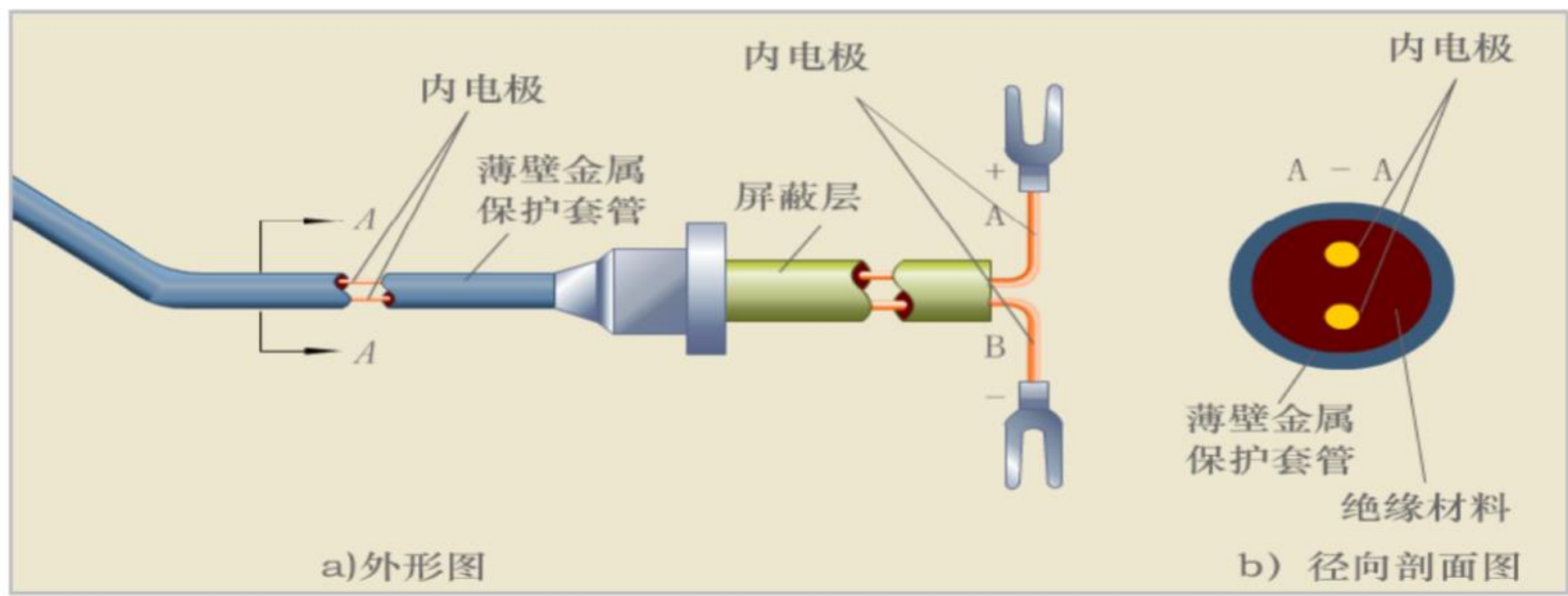
2. 铠装型热电偶

- **制造工艺**：把热电极材料与高温绝缘材料预置在金属保护管中，将这三者合为一体，将工作端焊接密封。
- **特点**：内部的热电偶丝与外界空气隔绝，有着良好的抗高温氧化性能。可以制作得很细，能解决微小、狭窄场合的测温问题，且具有抗外力冲击、可弯曲、超长等优点。



四、热电偶的材料、类型及结构

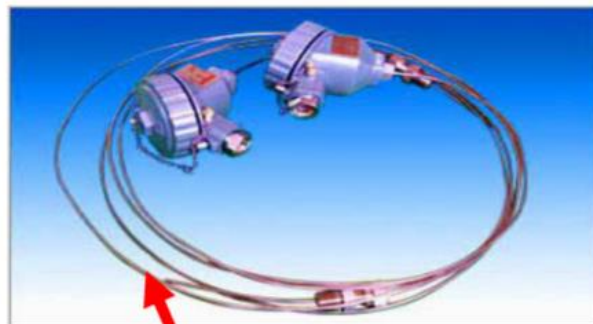
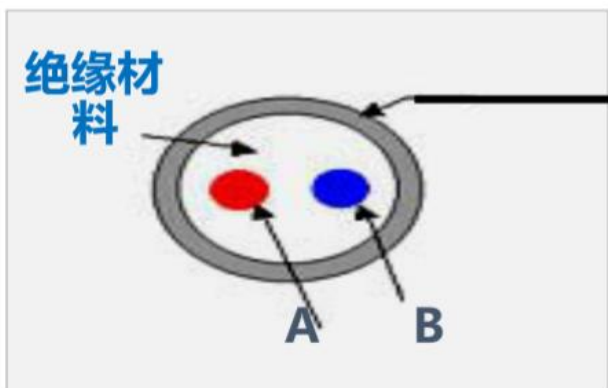
2. 铠装型热电偶



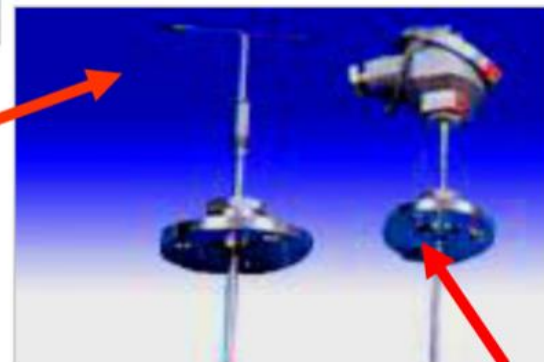


四、热电偶的材料、类型及结构

铠装型热电偶可长达上百米



薄壁金属保护套管
(铠体)
铠装型热电偶横截面



法兰



四、热电偶的材料、类型及结构

3. 隔爆型热电偶

- **防爆原理**：利用间隙隔爆原理，设计具有足够强度的接线盒等部件，将所有会产生火花、电弧和危险温度的零部件都密封在接线盒内，当腔内发生爆炸时，能通过接合面间隙熄火和冷却，使爆炸后的火焰和温度不传到腔外。
- **使用场合**：工业用的隔爆型热电偶多用于**化学工业自控系统**中（由于在化工生产厂、生产现场常伴有各种易燃、易爆等化学气体或蒸汽，如果用普通热电偶则非常不安全、很容易引起环境气体爆炸）。



四、热电偶的材料、类型及结构

3. 隔爆型热电偶



厚壁保护管

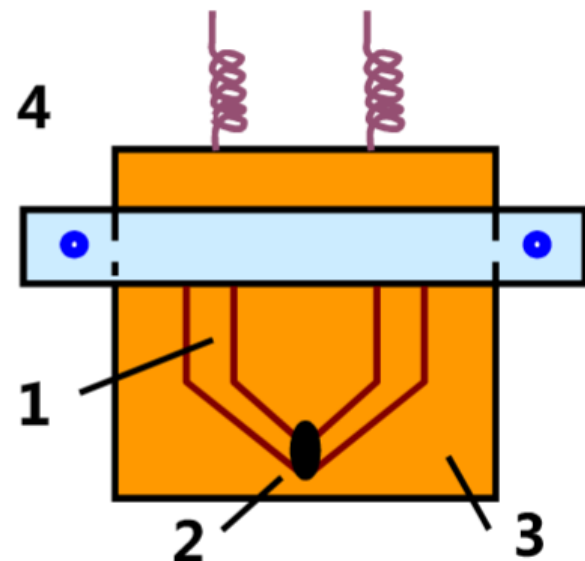
压铸的接线盒

电缆线

四、热电偶的材料、类型及结构

4. 薄膜热电偶

- 用真空蒸镀等方法使两种热电极材料蒸镀到绝缘板上而形成薄膜装热电偶。其热结点极薄($0.01 \sim 0.1\mu\text{m}$)。
- 特别适用于对壁面温度的快速测量。反应时间仅为几ms。



1—热电极; 2—热结点;
3—绝缘基板; 4—引出线



四、热电偶的材料、类型及结构

5. 其他热电偶外形



小形K型热电偶





五、热电偶的动态特性

1. 热平衡方程

根据介质以对流换热的方式向热电偶接点单位时间所传递的热量应该等于接点单位时间积储的热量，可推导出如下的方程：

$$\tau \frac{dT_j}{dt} + T_j = T$$

式中： T_j - 接点温度； T - 气体真实温度； τ - 时间常数

$$\tau = \frac{c \cdot \rho \cdot v}{\alpha \cdot F}$$

式中： c - 热接点比热； ρ - 热接点材料的质量密度；
 v - 热接点体积； α - 对流换热系数； F - 热接点表面积。



五、热电偶的动态特性

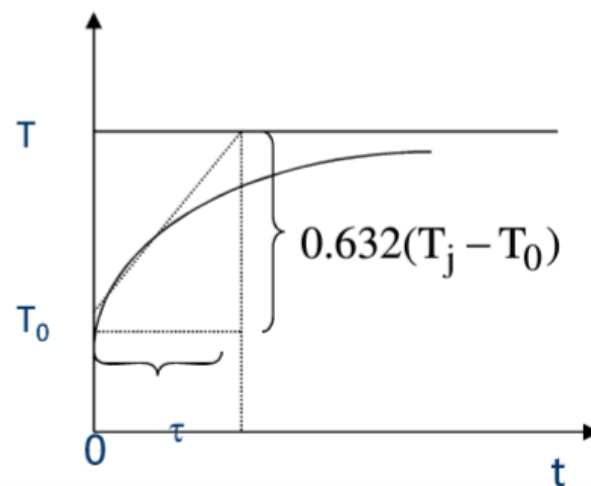
2. 动态响应

将热电偶从室温 T_0 突然插入到温度为 T 到温度场中，则热电偶热接点到温度 T_j 为：

$$T_j = T_0 + (T - T_0) \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right)$$

若在 $t=0$ 时刻时， $T_0=0$ ，则：

$$T_j = T \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right)$$





五、热电偶的动态特性

3. 减小动态误差的方法

$$\tau = \frac{c \cdot \rho \cdot v}{\alpha \cdot F}$$

- 采用尺寸较小和V/F较小的测量端（对于球， $V/F=D/6$ ）；
- 选用比热小、密度小的热电极材料；
- 增大对流换热系数；
- 采用校正网络。



六、热电偶的应用

在冶金、电力、石化、机械、国防等领域，热电偶广泛的用于炉子、管道、加热容器、机电设备等的温度测量。



六、热电偶的应用

- 在陶瓷烧制、金属冶炼过程中，用热电偶进行炉温的测量

