

# 水泥窑热工测量

建筑材料科学研究院水泥研究所 编著

中国建筑工业出版社

# 水泥窑热工测量

建筑材料科学研究院水泥研究所 编著

中国建筑工业出版社

本书较系统地介绍了水泥工业中现行的回转窑和立窑热工测量方法与简要原理，其中有：气体温度、压力、流速、流量、含湿浓度和湿度的测量；物料温度的测量；按废气成分计算单位热耗的简便方法；以及热平衡与物料平衡计算等。书后附有热工计算常用的数据和参考资料。

本书对象为水泥工业热工测量工作者和工程技术人员，也可供水泥专业院校师生和其它工业热工测量工作者参考。

## 水泥窑热工测量

建筑材料科学研究院水泥研究所 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

\*

开本：850×1168 毫米 1/32 印张：7<sup>1</sup>/<sub>2</sub> 字数：199 千字

1979年12月第一版 1979年12月第一次印刷

印数：1— 7,320 册 定价：0.73元

统一书号：15040·3629

## 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，但我们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 温度测量	1
第一节 测量温度的仪表	1
一、水银温度计	1
二、电阻温度计	2
三、热电偶高温计	2
四、光学高温计	11
五、全辐射高温计	13
六、光电比色高温计	14
第二节 回转窑内气体温度的测量	15
一、由辐射热交换产生的误差	16
二、抽气热电偶	17
三、窑内气体温度的测量	23
第三节 二次空气温度的测量	24
一、抽气热电偶测量法	24
二、从热平衡计算二次空气温度	25
第四节 回转窑内物料温度的测量	28
一、用坩埚热电偶测量物料温度	28
二、用快速热电偶测量物料温度	28
三、用袋式测温器测量回转窑内物料温度	30
四、用光电比色高温计测量回转窑烧成带物料温度	32
第五节 窑体表面热损失的测定	33
一、测量表面温度的仪器	34
二、表面热损失的计算	36
第二章 压力的测量	44
第一节 压力测量的有关知识	44
一、压力的种类	44
二、常用的压力单位	45
第二节 测量压力的常用仪器	46
一、U形管压力计	46

二、倾斜微压计 .....	47
三、钟罩式压力计 .....	48
四、弹簧管压力表 .....	49
五、膜式压力表 .....	50
六、霍尔微压计 .....	51
第三节 回转窑上压力的测量 .....	51
一、窑头和窑尾的负压测量 .....	51
二、管道中气体压力的测量 .....	53
三、测量压力时应注意的事项 .....	55
第三章 气体流速和流量的测量 .....	57
第一节 管道内气体流速的分布 .....	57
第二节 测量气体流速和流量的仪器 .....	58
一、动压测定管 .....	58
二、风速计 .....	73
三、孔板流量计 .....	74
四、湿式流量计 .....	79
第三节 回转窑上气体流速和流量的测量 .....	80
一、一次空气的测量 .....	80
二、排风量的测量 .....	83
三、二次空气的测量 .....	84
四、窑头窑尾漏风量的测量 .....	86
第四章 气体含尘量的测量 .....	88
第一节 气体含尘量的一般测定方法及测定仪器 .....	88
一、含尘量的测定方法 .....	88
二、测定用的主要仪器和设备 .....	91
第二节 稳定气流中含尘量的测定 .....	98
一、测定用的仪器和流程 .....	98
二、测定方法和操作要求 .....	99
三、测定结果的计算 .....	100
四、测定误差及其影响因素 .....	101
第三节 不稳定气流中含尘量的测定 .....	102
一、测定流程及其仪器设备 .....	102
二、测定方法及其操作要求 .....	103

三、测定结果的计算和影响因素 .....	104
第四节 介绍几种含尘量的测定装置 .....	106
一、收尘取样嘴湿式流量计（或孔板流量计）	
组合的测尘方法 .....	106
二、BLC-1型烟尘浓度测定仪 .....	107
三、YC-1型烟尘测试仪 .....	108
第五章 气体湿度的测定 .....	111
第一节 水蒸气吸收法 .....	113
第二节 化学分析法 .....	114
第三节 干湿球温度计法 .....	114
第四节 冷凝法 .....	119
第五节 自动干湿球温度计 .....	120
一、用途 .....	120
二、工作原理及其结构 .....	120
三、技术数据 .....	120
第六章 烟气成分的分析 .....	122
第一节 奥氏分析器法 .....	122
一、分析步骤 .....	123
二、吸收剂的配制 .....	124
三、烟气分析的一般要求 .....	124
第二节 仪器分析方法 .....	125
一、氧气自动分析器 .....	125
二、二氧化碳自动分析器 .....	127
三、红外线气体分析器 .....	129
第三节 烟气的过剩空气系数 .....	131
第四节 用烟气分析计算热耗 .....	131
一、计算方法 .....	131
二、用烟气分析计算热耗的实例 .....	133
第七章 燃料的发热量和燃烧气体量计算 .....	135
第一节 燃料发热量的计算 .....	135
一、燃料各种基准成分的表示方法及换算 .....	135
二、无烟煤低位发热量经验计算公式 .....	136
三、烟煤低位发热量经验计算公式 .....	137

四、按元素分析成分计算发热量 .....	138
五、分析基弹筒发热量的换算 .....	138
第二节 计算举例 .....	139
第三节 燃料燃烧气体量计算 .....	140
一、燃料燃烧所需空气量的计算 .....	140
二、燃料燃烧时烟气生成量的计算 .....	140
三、燃烧气体量的简便算法 .....	141
第八章 立窑的热工测量 .....	143
第一节 温度的测量 .....	143
一、烟囱废气温度的测量 .....	143
二、窑面各点废气温度的测量 .....	144
三、高温带温度的测量 .....	144
四、窑体表面温度的测量 .....	145
五、出窑熟料温度的测量 .....	146
第二节 窑内不同深度压力的测量 .....	146
第三节 气体流量的测量 .....	147
一、烟囱废气量的测量 .....	147
二、窑罩入料口和加料门漏风量的测量 .....	148
三、卸料门漏风量的测量 .....	148
四、入窑风量的测量 .....	148
第四节 烟气含尘量的测量 .....	149
第五节 烟气湿度的测量 .....	149
第六节 烟气分析 .....	149
一、烟囱废气成分的测量 .....	149
二、窑面各点烟气成分的测量 .....	150
第七节 窑内不同深度物料成分的测量 .....	151
第九章 测量实例 .....	153
第一节 测量项目及计算 .....	155
一、回转窑 .....	155
二、二次风管（入分解炉的二次空气管道） .....	156
三、冷却机（回转篦式冷却机） .....	159
四、分解预热系统 .....	161
五、含尘量 .....	168
六、含湿量 .....	170



七、原、燃料 .....	170
八、环境温度 .....	171
第二节 热平衡 .....	172
一、热收入 .....	172
二、热支出 .....	173
三、热平衡 .....	177
第三节 物料平衡 .....	177
一、收入项 .....	177
二、支出项 .....	178
三、物料平衡 .....	178
第四节 冷却机热平衡 .....	179
一、热收入 .....	179
二、热支出 .....	179
三、热平衡及热效率 .....	180
附录 .....	181
一、常用计量单位及换算关系 .....	181
二、常用化学元素表 .....	185
三、常用气体性质表 .....	186
四、常用气体的平均体积比热 $C_p$ (千卡/标米 <sup>3</sup> ·°C) .....	187
五、气体的粘度 .....	188
六、气体的导热系数(10 <sup>-3</sup> 千卡/米·时·°C) .....	189
七、热电偶分度表 .....	190
八、常用材料的比热及导热系数 .....	201
九、煤、灰的比热及导热系数 .....	203
十、水泥工业常用矿物的平均单位比热 .....	204
十一、数的平方、立方、平方根、立方根、圆 周长、圆面积及倒数表 .....	205
十二、各国筛网标准 .....	208
十三、空气的相对湿度表 .....	212
十四、在 760 毫米汞柱压力下空气饱和时水蒸 气压力和含湿量 .....	224
十五、根据湿度差和干温度计的温度计算 $f$ 的图表 .....	227
十六、湿空气(以其中所含的每 1 千克干空气为基准) 在 745 毫米汞柱时的 $l-d$ 图 .....	228
参考文献 .....	229

# 第一章 温度测量

## 第一节 测量温度的仪表

温度是反映水泥窑热工状态最重要的参数之一。为了测量温度，工业上使用了各种不同工作原理的测量仪表，下面只把在水泥生产中常用的几种介绍一下。

### 一、水银温度计

水银温度计可在 $-30^{\circ}\text{C}\sim+700^{\circ}\text{C}$ 范围内使用。它的主要缺点是水银的膨胀系数比较小，灵敏度较低。其主要优点是构造简单，经济，使用方便。

水银温度计是在完全浸入温度不变的介质时，按标准温度计进行刻度的。在测量温度时，如果没有将温度计全部插入被测介质中，则会产生误差，因此必须将露出部分的温度在指示值上加以校正。方法是将一只辅助温度计用石棉绳绑在主温度计杆上，其位置应在主温度计水银柱露出部分的三分之一高度上，如图1-1所示。

校正值按下式求出：

$$\Delta t = n\alpha(t - t_1) \quad (1-1)$$

式中  $\Delta t$ ——水银柱露出的校正值；

$n$ ——露出水银柱的度数；

$\alpha$ ——水银的线膨胀系数，约等于0.00016；

$t$ ——温度计指示读数，即主温度计的示值。

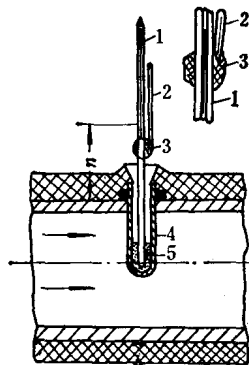


图 1-1 液柱露出部分温度的测量

1—主要温度表；2—辅助温度表；  
3—石棉绳；4—套筒；5—油

$t_1$ ——露出水银柱周围空气平均温度，即辅助温度计的示值。

真正温度 $t_u$ 等于：

$$t_u = t + \Delta t \quad (1-2)$$

例：用水银温度计测量某介质时，仅插到刻度为 $100^{\circ}\text{C}$ 的地方而指示值为 $400^{\circ}\text{C}$ ，露出的液柱周围温度等于 $60^{\circ}\text{C}$ ，在此情况下的校正值为：

$$\Delta t = (400 - 100) \times 0.00016 \times (400 - 60) = 16.4^{\circ}\text{C}$$

即真实温度等于 $416.4^{\circ}\text{C}$ 。

## 二、电阻温度计

电阻温度计的工作原理是基于导体或半导体的电阻随温度变化的性质来测量温度的。大多数金属材料当温度升高 $1^{\circ}\text{C}$ 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。

电阻温度计可以测量 $-120^{\circ}\sim +500^{\circ}\text{C}$ 范围内的温度，它适宜测量一个空间或一个表面部分的平均温度，而不适宜测量个别点的温度，测量准确度较高但热惰性较大。通常用来测量给水、油、热风和烟道排气的温度。

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的金属管上，装入保护套管内，如图1-2所示。它的技术参数列入表1-1内。

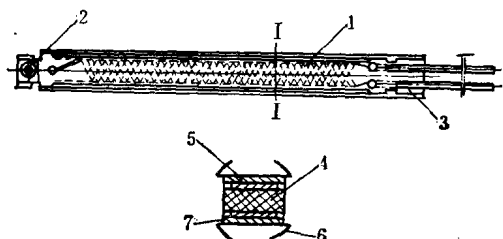
## 三、热电偶高温计

在水泥厂中，热电偶高温计常用来测量烟气、蒸汽、空气、

铂铜热电阻元件技术参数

表 1-1

热电阻种类	精度等级	分度号	0°C时电阻值和允许误差(欧姆)	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(°C)
铂热电阻	II	BA <sub>1</sub>	46±0.046	1.391±0.001	-200~+500
		BA <sub>2</sub>	100±0.1		
		BA <sub>3</sub>	300±0.3		
铜热电阻	III	G	53±0.053	1.425±0.002	-50~+100



I-I 断面

图 1-2a 铂热电阻敏感元件

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



图 1-2b 铜热电阻敏感元件

1—铜导线；2—补偿绕组或札线；3—铜电阻丝；4—塑料骨架

物料、燃料及窑壁等温度。它测量范围广，一般可测 -100~+1600°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1-3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

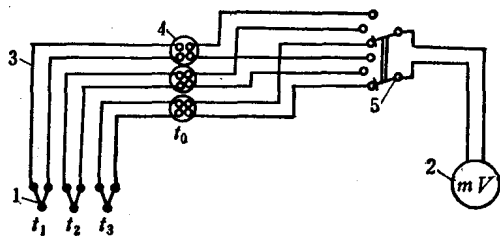


图 1-3 热电偶高温计接线图

1—热电偶元件；2—二次仪表；3—补偿导线；  
4—冷端温度补偿器；5—转换开关

互相结合。（热端），另一端称为自由端（冷端），当两端的温度不同时，就会产生一个热电动势，每  $1^{\circ}\text{C}$  温差是  $0.01\sim 0.06$  毫伏，可用毫伏计或电位差计准确地测量出来。

从电子学理论可知，在一切金属导体内部都存在着自由电子，而且不同的金属  $A$  和  $B$  在单位体积内自由电子数  $N_A$  和  $N_B$  也不相同。 $N_A$  和  $N_B$  除决定于金属本身性质外，还取决于金属的温度，通常当温度升高时，自由电子数量就增加；但是对于不同的金属其增加的速度是不同的。

如图1-4所示，一闭合电路，由两种不同的导体  $A$  和  $B$  组成，形成一个热电偶。它的一端有比较高的温度  $t$ ，而另一端的温度较低为  $t_0$ 。假设  $A$ 、 $B$  两种导体单位体积内的自由电子数  $N_A > N_B$ 。那末，在温度为  $t$  的热端，由热电极  $A$  扩散到热电极  $B$  的自由电子数量多于由  $B$  扩散到  $A$  的数量。因此热电极  $A$  失掉电子而带正电荷热电极  $B$  则带负电荷，即产生电动势  $e$ 。由于电动势的产生，它将阻碍这种扩散作用，并且形成了电子流动的平衡状态。产生的电动势取决于热电极材料的性质和温度  $t$ ，同样在温度为  $t_0$  的冷端也产生电动势，但由于这两个端点的温度不同，所以它们所产生的电动势也不同。另外，在同一种导体内，两端温度不同时也会出现电位差。

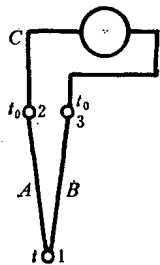


图 1-4 在热电偶冷端接入仪表的方法

## 2. 热电偶的构造和型式：

(1) 对热电偶的材料的要求:

- 1) 在测量范围内热电性质不随时间改变;
- 2) 高温下不受氧化和腐蚀;
- 3) 电阻温度系数要小, 导电率要高, 组成热电偶后产生的热电势要大;
- 4) 热电势和温度成线性关系, 或有简单的函数关系;
- 5) 复现性好。

但是, 在目前采用的热电极材料中, 没有一种能完全满足上述要求的。所以在不同测温条件下, 要用不同的热电极材料。一般常用的有: 1) 由贵金属制成的铂铑-铂热电偶, 测量高温及作为标准偶用。2) 由非贵金属制成的镍铬-镍铝热电偶、镍铬-镍硅热电偶、镍铬-考铜热电偶、铁-考铜热电偶和铜-康铜热电偶等。这些热电偶广泛地应用于各工业部门, 它们的测温上限较贵金属热电偶低。3) 还有用金属热电极和非金属热电极所制成的能测量更高温度的热电偶。

现将几种常用的热电偶的主要参数列入表1-2中。

常用热电偶的主要参数

表 1-2

热电偶名称	分度号	使用上限温度(°C)		与短时使用上限相应的热电势(毫伏)	正负级识别	
		长 时	短 时		+	-
铂铑-铂铑	LL	1600	1800	—	较 硬	较 软
铂铑-铂	LB-3 ①	1300	1600	16.688	较 硬	较 软
镍铬-镍硅 (镍铬-镍铝)	EU-2 ①	1000	1300	52.37	无磁性	稍有磁性
镍铬-考铜	EA-2 ④	600	800	66.36	—	银灰色
铁-康铜	TK	600	870	49.98②	强磁性	无磁性
铁-考铜	—	600	800	51.17③	强磁性	无磁性
铜-考铜	—	350	500	37.58③	纯铜色	银灰色
钨 钼	—	—	2000	28~32③	较 硬	较 软

①按1968年国际实用温标(IPTS-68)修正后的分度号。

②分度表尚未按(IPTS-68)修正。

③参考数值。

④本栏按《JB 13-66工业热电偶技术条件》的规定。t——被测温度(°C)。

## (2) 保护套管:

保护套管所用材料的条件是: 1) 不怕温度骤变; 2) 热导率大; 3) 在高温下不变质; 4) 不漏气等。常用的热电偶保护管材料的使用温度列入表1-3内。

热电偶保护管的材料和使用温度

表 1-3

材 料	常用温度(°C)	材 料	常用温度(°C)
玻璃管	500	铜 管	300
石英管	1000	黄 铜 管	400
耐火粘土管	1300	钢 管	600
陶器管	1400	合 金 钢 管	800
高纯氧化铝管	1600	高 铬 合 金 管	1050
氧化镁管①	>1800		

①不能在真空、氢气及碳中使用。

## (3) 二次仪表:

用来测量热电偶产生的热电势的仪表。在工业中常用的有毫伏计和电子自动电位差计。毫伏计是一种磁电式仪表, 它有盘用型和便携式两种。在精密测量中则使用电位差计, 它回路的电阻值对测量无影响, 但读数较麻烦。电位差计的原理是将热电偶所产生的热电势, 用大小相等方向相反的辅助电源的电势来抵消。而这一辅助电源的电势的测定不仅能够精密而且方便。

### 3. 热电偶高温计的测量误差及防止方法:

#### (1) 热电偶冷端温度的补偿:

热电偶通常是在冷接点温度保持在 0°C 时刻度的。在实际应用中经常不能保持这个条件, 便引起测量误差。为了消除这种误差, 介绍以下几种方法:

##### 1) 用计算法求补正值:

当热电偶的冷接点温度改变为  $t'_0$  时, 其热电势所改变的数值, 等于这个热电偶在热接点温度为  $t'$  而冷接点温度仍为原来刻度时的温度  $t_0$  (0°C) 时所产生的热电势, 其计算公式如下:

$$E_{AB}(t, t_0) = E_{AB}(t, t'_0) + E_{AB}(t'_0, t_0) \quad (1-3)$$

例如：用镍铬考铜热电偶测量时，实际冷端温度  $t'_0=60^\circ\text{C}$ ，测得热电偶的热电势  $E_{AB}(t, t'_0)=E_{AB}(t, 60^\circ)=31.0$ 毫伏，由查表得  $E_{AB}(t'_0, t_0)=E_{AB}(60^\circ, 0^\circ)=4.05$ 毫伏

代入上式则：

$$E_{AB}(t, t_0)=31.0+4.05=35.05 \text{ (毫伏)}$$

查表得出测量的实际温度应为  $441^\circ\text{C}$ 。

## 2) 冷端恒温法：

(a) 将冷端放在带有夹层的容器内，夹层中充有油或水（流动或不流动的），由于其热惰性较大而使冷端温度大致保持稳定。

(b) 将冷端放在盛满冰、水混合物的瓶内，可长期保持  $0^\circ\text{C}$ 。

(c) 将冷端放在带电加热的恒温器内，用电接点水银温度控制器控温，可以使温度保持在  $50 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 。

(d) 将热电偶的电极延长而将冷端从温度较高、变化较大的地点引开，移到温度较低变化较小的地点。延长的部分通常采用非贵金属制成的补偿导线，补偿导线的热电特性，在温差  $100^\circ\text{C}$  范围内和原热电偶相同。常用的补偿导线列于表1-4内。

常用热电偶的补偿导线

表 1-4

热电偶名称	补 偿 导 线				工作端为 $100^\circ\text{C}$ 冷端为 $0^\circ\text{C}$ 时的 标准热电势 (毫伏)	截面为 $1.5$ 毫米 <sup>2</sup> 的导线，每米长 的电阻值 (欧姆)
	正 极		负 极			
	材料	色	材料	色		
铂铑-铂	铜	红	铜镍	绿	$0.64 \pm 0.03$	0.03
镍铬-镍硅 (镍铬-镍铝)	铜镍 铜	紫 红	镍铝 康铜	黑 棕	} $4.10 \pm 0.15$	0.35
镍铬-考铜	镍铬	紫	考铜	黄		
铜-考铜	铜	红	考铜	黄	$4.76 \pm 0.15$	0.33

(e) 将冷端接入和热电偶配套的温度补偿器内。这种补偿



器是利用不平衡电桥的原理制成的，当补偿器的温度（即冷端温度）偏离规定的温度（ $20^{\circ}\text{C}$ ）时，它会产生一个微小的不平衡电动势，直接加到测量回路内而使误差得到补偿。这样就相当于冷端总保持规定值 $20^{\circ}\text{C}$ 。补偿器的使用温度为 $0^{\circ}\text{C}\sim 50^{\circ}\text{C}$ 之间。这种方法在工业上用得最多。接线方法如图1-5所示。国产冷端温度补偿器的型号和规格列入表1-5内。

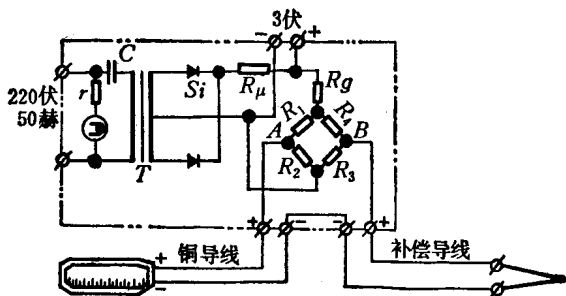


图 1-5 冷端温度补偿器的接线原理图

## （2）热电偶元件的安装：

1) 热电偶元件应安装在介质流速最大的地方，不能放在死角处。测量管道内的介质温度时，要使热电偶元件有足够的插入深度，不能少于150毫米，其工作端最好处于管道中心线上，如图1-6所示。保护管的露出部分应尽量短并要妥善保温而且和器壁也要隔热。

冷端温度补偿器的型号和规格

表 1-5

型 号	配用的热电偶	电桥平衡温度( $^{\circ}\text{C}$ )	补偿温度范围( $^{\circ}\text{C}$ )	电 源 (伏)	补偿误差
WBC-01	铂铑-铂	$20^{\circ}$	$0\sim 50$	$\sim 220$	$\pm 0.045$ 毫伏
WBC-02	镍铬-镍铝	—	—	—	$\pm 0.16$ 毫伏
WBC-03	镍铬-考铜	—	—	—	$\pm 0.18$ 毫伏

2) 要避免和尽量减少热电偶元件与周围炉壁和管壁的辐射