

目 录

(上)

第一章 误差计算和实验数据处理

- § 1. 实验误差的来源
- § 2. 误差的表示方法
- § 3. 有效数字与计算规则
- § 4. 可疑观测值的捨弃
- § 5. 间接测量中的误差
- § 6. 实验数据列表表示法
- § 7. 实验数据图形表示法
- § 8. 实验数据方程表示法
- § 9. 插值法

第二章 高温的获得

- § 1. 获得高温的一般方法
- § 2. 电阻加热法
 - 1. 常用的电热材料及特性
 - 2. 电热体的表面负荷
 - 3. 绝热材料
 - 4. 实验室用管式炉
 - 5. 电阻炉制作计算举例

第三章 温度及其测量方法

- § 1. 温标及温度的测量方法
- § 2. 热电偶高温计
 - 1. 热电偶的工作原理

2. 热电偶材料
3. 热电偶的绝缘管与保护管材料
4. 铠热电偶
5. 热电偶的检定
6. 热电偶的使用及其误差
- § 3. 辐射式高温计

第四章 实验室用耐火材料

- § 1. 选择合适的耐火材料的重要性
- § 2. 耐火氧化物材料
- § 3. 复合氧化物耐火材料
- § 4. 石墨和碳化物耐火材料
- § 5. 氮化物耐火材料
- § 6. 硼化物耐火材料
- § 7. 硫化物耐火材料
- § 8. 高熔点金属容器
- § 9. 金属陶瓷
- § 10. 耐火氧化物制品的成型和烧结方法
- § 11. 某些常用耐火物制品性质及制备
- § 12. 结论

第五章 真空技术

- § 1. 真空的获得及真空泵
 1. 真空泵的主要技术性能
 2. 机械真空泵
 3. 蒸汽流泵
 4. 表面吸附泵

- § 2. 真空测量——真空计
- § 3. 真空的检漏技术
- § 4. 真空管道, 阀门及其它附件
- § 5. 真空系统和真空设备

第六章 气体净化及气氛控制

- § 1. 概述
- § 2. 气体的制备, 保存和安全使用
- § 3. 气体净化的基本方法
- § 4. 常用气体净化剂
- § 5. 常用气体的净化方法
- § 6. 气体流量的测定
- § 7. 定组成混合气体的配制
- § 8. 关于装置中气体的置换问题

第七章 量 热

- § 1. 基本概念
- § 2. 量热计的分类及一般构造
 - 1. 量热计分类
 - 2. 液体量热计
 - 3. 固体量热计
 - 4. 等温量热计
 - 5. 双子量热计
 - 6. 高温量热计
- § 3. 近代量热方法的基本原理
- § 4. 量热计热当量的标定
- § 5. 量热学中的温度测量

- § 6. 外套等温法量热实验与热交换改正值的计算
- § 7. 温度控制及绝热条件的获得
- § 8. 减少热交换的方法
- § 9. 量热误差
- § 10. 溶解热的测定
- § 11. 用弹式量热计测定燃烧热
- § 12. 热容的测定
- § 13. 混和热的测定
- § 14. 量热方法的比较

第八章 固体电解质原电池及其在冶金物理化学研究中的应用

- § 1. 引言
- § 2. 电动势法在测定化学反应热力学函数上的应用
- § 3. 电动势的测定方法
- § 4. 保证电池可逆的条件
- § 5. 固体电解质电池的工作原理
- § 6. 固体电解质
- § 7. 参比电极
- § 8. 被测电极
- § 9. 电极引出线
- § 10. 固体电解质电子导电性的修正及特征氧分压的测定
- § 11. 用固体CaS做电解质的硫浓差电池
- § 12. 电动势测量时应当注意的问题
- § 13. 电动势测定的误差问题
- § 14. 固体电解质电池在冶金物理化学研究中应用举例
- § 15. 用固体电解质已研究过的工作概况

第二章 高温的获得

在高温冶金物理化学研究中和各种冶炼过程中通常都需要很高温度，有时高达 1600°C 以上，这样高的温度要用特殊方法才能得到，本章主要讨论获得高温的基本方法和原理。

§ 1. 获得高温的一般方法

在实验室与工业生产中广泛应用的获得高温的方法是电加热方法。因为这种方法操作简便，容易控制，带来的杂质污染程度低，所以通常都是采用这种方法。

电加热的方法又可分为：电阻加热法，高频感应加热法和电子轰击加热法三种。其中电阻加热法就是使电流通过一种电阻材料（金属、非金属或化合物），直接把电能转变成热能获得高温，高频感应加热法是使高频振荡电流，通过一个感应加热线圈，在线圈内产生高频交变电磁场，此电磁场与被加热的物体（导体）发生感应，从而在被加热的物体内部将交变电磁场能量转换成热能，使物体加热到高温，电子轰击加热法是把一个直流高压（通常在数千伏），加在阴极（一般用钨制成）和被加热物体（阳极）之间，使得从阴极发射出来的电子流在高压电场中被加速，当这些高速运动的电子流轰击到被加热的物体（阳极）上时，电子流的动能就转变成热能，从而把物体加热到高温。

在这三种方法中，应用最多的还是电阻加热的方法，因为这种方法设备简单，成本低廉，而且可以满足一般工作的要求。后两种加热方法的特点是被加热区域集中（即能量集中），加热器本身处于冷状态，因此引起杂质污染的可能性要小，所以对于某些特殊要求的工作，例如金属中气体分析等则有时采用。

下面着重介绍电阻加热法和高频感应加热法，至于电子轰击加热法由于在生产上还没有广泛应用，所以涉及这方面的内容，可参阅有关文献。

§ 2. 电阻加热法

在前面已谈到，电阻加热法的特点就是在电流通过一个电阻材料时，将电能转换成了热能而得到了高温。因此，在这种加热方法中，电热材料（即电阻材料）的选择是很重要的。

1. 常用的电热材料及特性：

①镍铬电热材料：主要成份为Ni和Cr，是用于1000℃以下的金属电热元件。这种材料具有高的电阻率和高抗氧化性能，容易加工成各种尺寸的丝、带和片状电热元件，价格便宜，广泛地应用在实验室电炉上。

②铁铬铝电热材料：主要成份为含有铬和铝的铁基合金，比镍铬电热材料具有更高的电阻率和抗氧化性能，最高可用到1350℃。这种材料价格便宜也可以加工成丝、带和片状的加热元件。特别由于我国的镍矿较少，所以这种电热材料镍铬电热材料更为广泛地应用在工业和实验室的电炉中。

③碳化硅电热材料：主要成份为SiC，是一种非金属电热材料，通常是做棒状或管状的加热元件。常用温度为1200~1300℃最高可达1500℃。这种材料的电阻率很高，可以承受较大的表面负荷，但它的强度低而且脆，容易断裂，这一点在使用时应十分注意。

④二硅化钼电热材料：主要成份为 $MoSi_2$ ，是一种非金属电热材料，通常是做成棒状或U形的电热元件。这种材料的抗氧化性能很高，最高使用温度可达到1660℃，长时间使用时电阻率较稳定。这种材料较脆，容易断裂，使用时要注意。

⑤碳（石墨）电热材料：主要成份为C，也是一种非金属电热材料。一般被加工成管状或带有裂口的桶形加热元件。常用温度为1800~2200℃，最高可达2500℃。这种材料高温下很容易氧化，因此必须工作于保护气氛或真空之下。石墨的电阻率很低，且具有负的温度系数（即温度升高电阻降低），因此需采用低电压大电流的电源。

⑥钼电热材料：成份是纯金属钼，钼的熔点是 2630°C ，因此这种材料可使用到较高温，常用温度为 $1600\sim 1700^{\circ}\text{C}$ ，最高可达 1800°C 钼很容易氧化（超过 400°C 即氧化），所形成的氧化物（ Mo_2O_3 ）很容易挥发，所以，这种材料只能用于还原性气氛或者真空中。一般可制成丝、带和片状的加热元件。

⑦钨电热材料：成份是纯金属钨，钨的熔点为 3410°C ，常用温度在 $1800\sim 2000^{\circ}\text{C}$ ，最高可达 2300°C ，钨也很容易氧化，因此适用于还原性气氛，保护气氛或真空中。钨的加工很困难，因此通常是做成棒状或片状加热元件。

⑧钽电热材料：成份为纯金属钽，钽的熔点为 3030°C ，最高工作温度可达 2000°C 。钽的加工性能要比钼、钨强，可以制成丝、带或管状加热元件。钽很容易吸附气体（如氮、氢），因此通常是工作在真空中。

(9)铂和铂铑合金电热材料：纯铂和铂铑合金（如 $80\%\text{Pt}-20\%\text{Rh}$ ）的熔点在 1700°C 以上，通常用于 $1300\sim 1400^{\circ}\text{C}$ 温度范围，铂铑合金还可用于 1540°C 。在高温之下铂很容易挥发，而且很容易与一些元素（如Si、Fe、S、C等）起化学反应，因此在使用时要注意。这种电热材料的最大优点是电性能稳定，缺点是价格极其昂贵，因此只能适用在有特殊用途的小型实验室炉子上。

各种电热材料的性能见表1。

2. 电热体的表面负荷

电热体的表面负荷表示电热体单位表面积上所承受的功率值，它的计算法是以电热体释放出的总功率除以电热体工作部分的表面面积，单位是瓦/厘米²。

在相同的工作温度下，电热体的表面负荷较大，则炉子所需要的电热材料的数量较少些，但此时电热材料的使用寿命要短，反之，当表面负荷较小时，虽然它的使用寿命延长，但消耗的电热材料又要增加。所以，

铁铬铝材料与镍铬材料的表面负荷值

表 2

性质 材料 温度 ℃	正 常 表			负 荷			瓦 / 厘 米 ²				
	铁 铬 铝 材 料			镍 铬 材 料			镍 铬 材 料				
	Cr27Al6	Cr27Al5	Cr25Al5	Ni23	Ni18	Cr25	Ni20	SiCr2Q	Ni80	Cr15	Ni60
500	5.10~8.40	3.90~8.45	2.6~4.2			2.40~3.40					
550	4.75~7.95	3.65~7.90	2.4~4.0			2.25~3.15					
600	4.40~7.50	3.44~7.35	2.2~3.8			2.05~2.95					
650	4.05~7.05	3.15~6.80	2.0~3.7			1.90~2.75					
700	3.75~6.60	2.90~6.25	1.85~3.5			1.70~2.55					
750	3.45~6.15	2.70~5.70	1.7~3.3			1.55~2.30					
800	3.15~5.70	2.50~5.15	1.6~3.05			1.35~2.10					
850	2.8~5.25	2.25~4.60	1.5~2.75			1.20~1.85					
900	2.5~4.80	2.00~4.05	1.35~2.4			1.05~1.65					
950	2.25~4.35	1.80~3.50	1.25~2.0			0.9 ~1.45					
1000	1.95~3.90	1.60~2.90	1.15~1.5			0.75~1.25					
1050	1.75~3.45	1.45~2.55	1.05~1.2			0.60~1.0					
1100	1.55~3.00	1.25~2.20	1.0 ~						0.5~0.8		
1150	1.40~2.45	1.15~1.90									
1200	1.25~2.00	1.0 ~1.65									
1250	1.11~1.7										
1300	1.0~1.6										
1350											

对于一定工作温度，电热材料有一个适中的许用表面负荷数值。

通常许用表面负荷的大小是与加热元件、陶瓷支架、电炉内的气氛以及开关次数的频繁与否等等因素有关。因此，对于一个具体工作条件下的电热体表面负荷的选择，要根据实际情况来确定。表2至表5中所推荐的数据仅表明在一般工作条件下不同工作温度的表面负荷值，而且建议在正常使用情况时，采用表中所列的下限数据。

钼、钨、钽表面负荷值

表3

性质 材料	表面负荷 瓦/厘米 ²	
	温度 < 1800°C 连续使用	温度 > 1800°C 短时间使用
钼 Mo	10~20	20~40
钨 W	10~20	20~40
钽 Ta	10~20	20~40

MoSi₂ 的表面负荷

表4

性质	温度°C	1470~1550	1520~1600	1590~1650
表面负荷瓦/厘米 ²		14~22	11~18	9~15

硅碳棒表面负荷

表5

性质	温度°C	800	1000	1200	1400
表面负荷瓦/厘米 ²		40~50	28~31	15~18	10~12

3、绝热材料

为使一个电阻炉达到所需要的高温，除了要有电热体将电能转换成热能外，还需要有一层绝热材料包围着发热体，以防止热流向外散失。

一般实验室高温炉的热损失主要有两种途径：①辐射传热损失；②传

导传热损失。为了减少辐射热损失，通常是采用在电热体与周围空间之间，加上金属或石墨隔热屏的方法，来阻止辐射传热。为了减少传导传热损失，通常是把绝热材料填充在电热体与周围空间之间，也即加上一层绝热层，以阻止热量的传导。绝热材料按其能够承受温度的高低又分为两类：耐火材料〔表6〕和保温材料〔表7〕。耐火材料一般是指能承受 1100°C 以上高温的绝热材料，而保温材料则一般是指最高只能承受 1100°C 以下温度的绝热材料，应该指出，这种分类法只是一种习惯上的分法，而不是一个绝对的本质上的区别方法。

4、实验室用管式炉

实验室管式电炉一般是指炉膛为管状的实验室用小型电阻加热炉。这种类型的炉子，通常都是根据所进行的实验内容要求由自己制做的。下面将介绍这种炉子的结构特点，炉子电学参数的设计以及制作过程中应该注意的事项。

(1)管式电炉的结构：

管式电炉主要是由电热体和绝热材料两部分组成。其中电热体是用于将电能转换成热能；而绝热材料则是用于起到保温的作用，以便炉体内达到一个尽可能高的温度，并且有一个合乎工作需要的温度分布。除这两个主要部分以外，炉体还包括有炉管、炉壳、炉架以及电源引线接头等等（见图1）。这里炉管是用于支承电热体和放置实验样品，炉壳用容纳绝热材料，炉架用于支持整炉体的重量，电流引线接头是用来保证在工作状态下，炉体与电源之间的绝缘。

(2)电热体功率的确定

管式电炉电热体的功率，取决于炉子所要达到的最高温度和炉体保温情况。对于一定的输入功率来讲，炉体保温情况越好，则所能达到的温度越高，而在保温情况一定时，则输入功率越大炉温越高，一般来讲，准确地知道一个炉子的保温情况是困难的，因此常常是采用经验规则来确定一

表 6

《电阻炉用耐火材料》

名 称	容 量 公斤/升	耐 火 度 ℃	熔许使用温 度 ℃	主 要 用 途
石墨制品	1.6	>3000	2000	高温电阻炉用耐火零件
氧化铝和刚玉制品	2.3~2.6	1780~1800	1500~1700	"
高 铝 砖	2.2~2.5	1750~1790	1500	1300℃以上电阻炉炉膛内层
碳化硅制品	2.3~2.6	1000~2200	1400~1500	实验室用电炉的成型炉芯, 耐火零件
耐火粘土砖	1.8~1.9	1610~1730	1350	电炉炉底用砖, 受负荷砖等
抗渗碳砖	1.0~1.3	约 1700	1250~1300	渗碳电阻炉炉衬内层用砖
轻质粘土砖	1.3	1670~1710	1300	1200℃电炉炉膛内层
轻质或泡沫土砖	1.0	1670	1250	1000℃电阻炉炉膛内层
泡沫粘土砖	0.6~0.8	1670	1200	"

《电阻炉用保温材料》

表7

名称	容量 公斤/升	最高使用 温度℃	主要用途
蛭石	0.08~0.17	1100	电阻炉保温层填料
硅藻土砖	0.5~0.7	900	电阻炉保温层用砖
膨胀珍珠岩散料	0.04~0.12	800	电阻炉保温层填料
矿渣棉	0.15~0.25	750	" "
膨胀珍珠岩砖	0.2~0.35	600	电阻炉保温层用砖
石棉板	1.0~14	600	电阻炉炉底、炉壳、炉顶待部份衬垫密封用材料
玻璃棉	0.02~0.2	450	低温电阻炉保温层填料

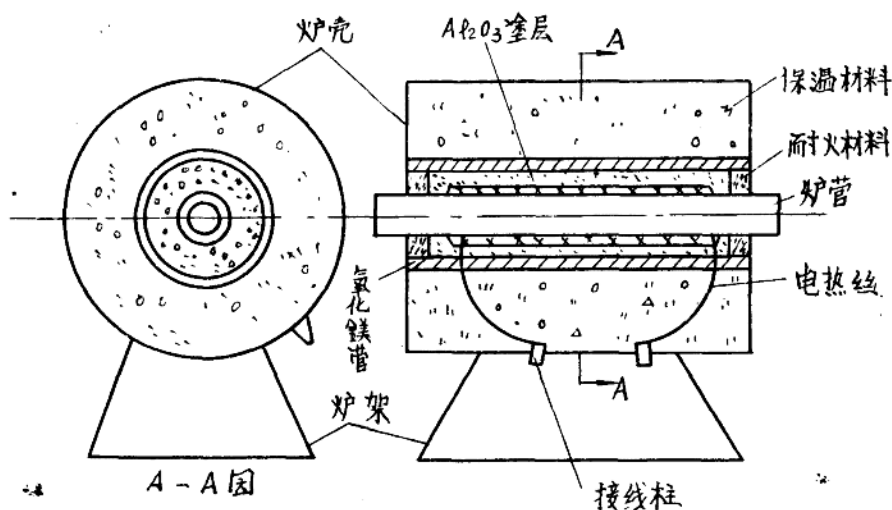


图1 管式电炉构造

个炉子所能达到的最高温度与电热体输入功率之间的关系。

对于一个中等绝热情况的炉子，要使炉管表面达到所需温度，在经验上有如下规则，

〔经验规则〕欲加热到 300°C 以内时，每 100厘米^2 炉管表面需要功率20瓦，从 300°C 至 700°C ，每升高 100°C 需增加功率 $20\text{瓦}/100\text{厘米}^2$ ，在 700°C 至 1100°C 之间，每升高 100°C 需增加 $30\text{瓦}/100\text{厘米}^2$ ，从 1100°C 至 1300°C ，每升高 100°C 需增加 $40\text{瓦}/100\text{厘米}^2$ ，从 1300°C 至 1600°C ，每升高 100°C 需增加 $50\text{瓦}/100\text{厘米}^2$ ， 1600°C 以上每升高 100°C ，需增加 $60\text{瓦}/100\text{厘米}^2$ 。

在计算炉子总功率时，首先要按炉管的直径 d （厘米）（通常炉管截面为圆形）和加热部分的长度 l （厘米），计算出加热部分的总面积 $S = \pi d l$ （厘米）²，然后按炉子所需达到的最高温度，查表8找出 100厘米^2 表面积所需要的功率值 σ ，由此计算出炉子的总功率 P ，

$$P = \sigma \cdot \frac{S}{100} \quad (\text{瓦})。$$

将上述规则列成表格如下:

不同温度下每100厘米²炉管表面所需功率: σ (瓦特/100厘米²) 表8

炉 温 ℃	300	400	500	600	700
功率 (瓦特/100厘米 ²)	20	40	60	80	100
炉 温 ℃	1200	1300	1400	1500	1600
功率 (瓦特/100厘米 ²)	260	300	350	400	450
炉 温 ℃	800	900	1000	1100	
功率 (瓦特/100厘米 ²)	130	160	190	220	
炉 温 ℃	1700	1800	1900	2000	
功率 (瓦特/100厘米 ²)	510	570	630	700	

应该指出,在利用上面经验规则时,要注意这里是对中等绝热情况的炉子而言的。对于绝热良好的炉子,例如炉体保温层很厚时,实际所需的功率要低于表8中所列数值;而绝热较差的炉子,例如水冷炉壁或炉管内空气对流散热很严重时,实际所需要的功率要高于表8中所列数值。

(8)电热丝参数的确定:

管式电炉一般是采用丝状的电热元件做为电热体的。这种类型的电热元件叫做电热丝。在管式电炉中,电热丝可以是直接缠绕在炉管上(单层缠绕,每圈之间隔开),也可以是先将电热丝绕成螺旋形,然后再将这个螺旋形电热体绕在炉管上。通常电热丝总长度较短时,可采用单层缠绕方法,而电热丝较长时,则需采用后一种方法。至于电热丝参数(种类、电阻值、截面积和长度等)的确定,则要根据炉体所要达到的最高温度,工作的条件以及炉体的总功率等因素来决定。

①电热丝种类的确定,一般根据炉体需要达到的最高工作温度和工作状态下炉体内的气氛来决定使用哪种电热丝。例如在氧化性气氛下,铁铬

铝电热材料可以使用到 1300°C ，但在有一氧化碳气体的还原性等气氛下，它只能工作到 1100°C 左右。用钼丝做电热体可工作到 1600°C 以上，但必须是在还原性气氛之下（如氢气），如果有氧气存在时，则短时间内即会烧坏。（见表 1）

②电热丝总电阻的确定，根据电热体的总功率 P （瓦特）和电源电压 V （伏）值，可以计算出电热丝所需通过的最大电流强度 I （ $I = \frac{P}{V}$ 安培）。通常在计算时，为了使电压有个调节余地，因此可按降低 10% 的电压值来算。例如电源电压为 220 伏时，可按 200 伏来计算。于是电热丝的总电阻 R （欧姆）应等于：

$$R = \frac{V^2}{P} = \frac{200 \times 200}{P} = \frac{4 \times 10^4}{P} \quad (\text{欧姆}) \quad (1)$$

通过的电流 I （安培）为：

$$I = \frac{P}{V} = \frac{P}{200} \quad (\text{安培}) \quad (2)$$

③电热丝截面积和总长度的确定：电热丝种类确定之后，我们可以根据最高工作温度来确定出电热丝的允许表面负荷 W （瓦/厘米²）再由电热丝的总电阻 R （欧姆）这种电热丝的比电阻 ρ （欧姆—厘米）以及其允许表面负荷 W （瓦/厘米²）（表 2），即可求出电热丝的截面积（直径）和长度。为了方便起见，可以将上述计算方法合并成下列公式：

$$d = \sqrt[3]{\frac{\rho P^2}{10 \pi^2 W}} \quad (\text{毫米}) \quad (3)$$

其中 d 为电热丝的直径，单位为毫米。

$$\pi = 3.14 \quad (\text{圆周率})$$

$$l = \sqrt[3]{\frac{P}{100 \pi \rho W^2}} \quad (\text{米}) \quad (4)$$

其中： l 为电热丝的长度，单位为米，其他符号同前。

应该指出，上述的计算方法，仅仅是粗略的估计方法，但对于一般实验室用途这已经是足够用了。

对于铁铬铝电热丝，其 1200°C 下的电阻率 $\rho = 150 \times 10^{-8}$ 欧姆·厘米，可将公式(8)和(4)绘成图2。由图2可直接查出制做功率 P (瓦特) 和允许表面负荷 W (瓦/厘米²) 的炉子，所需要的铁铬铝丝的直径 d (毫米) 和长度 l (米) 来。

例如我们要用 Cr27Al6 电热丝缠绕一管式炉，功率为 1.5 千瓦，工作温度需要达到 1300°C ，问应采用什么样直径的，长度为多少？

首先从表2中查出 Cr27Al6 电热丝在 1300°C 下，其正常表面负荷应为 1.0~1.5 瓦特/厘米²，为了安全起见，我们选其下限， $W = 1.0$ 瓦特/厘米²。再由图2查功率为 $P = 1.5$ 千瓦时， $W = 1.0$ 瓦特/厘米² 的铁铬铝丝长度 $l = 32$ (米)。此时丝的直径 $d = 1.5$ (毫米)。

(4) 绝热材料的厚度

为了减少炉体的热损失和降低炉壳的温度，在电热体外层要充填足够厚度的绝热材料。对于 1100°C 以下的炉子，可以直接填加保温材料(表7)，而 1100°C 以上的炉子，则在靠近电热体部分，应有一层耐火材料(表6)，在耐火材料外面再填充保温材料(见图1)。耐火材料和保温材料的厚度，应根据这些材料的导热性能来计算，但这种计算比较复杂。对于一般实验室的应用来说，可以粗略估计即可。通常 1200°C 左右的炉子，其耐火层大约有 50~70 毫米，保温层有 100~130 毫米即可。炉温更高时，各层可适当加厚，而炉温更低时，各层可适当减薄。在填充散状绝热材料时，应使其捣实，以免由于疏密不均，而影响炉内温度分布。(图2 见附页)

5. 举例

下面举一个实验室用的小电炉的计算作为示例。

(1) 条件:

炉管(烧结氧化铝管) $\phi 50 \times 60 \times 600$ (单位毫米), 要求最高工作温度为 1200°C , 电源电压为 220 伏, 工作环境为氧化性气氛(空气中)。

(2) 计算步骤:

① 加热面积计算: 为了使最高工作温度部分有足够的长度, 即要有足够长度的等温带, 我们选择电热体加热部分长度为 400 毫米长。由此需加热部分的表面积为:

$$S = \pi d L = 3.14 \times 50 \times 400 = 628 \times 10^2 \text{ (厘米}^2\text{)}$$

② 电炉加热功率的计算: 由表 8 查得 1200°C 每 100 厘米² 炉管表面积, 需要功率为 $\sigma = 260$ (瓦/100 厘米²), 因此电炉所需的总功率应为:

$$P = \sigma \times \frac{S}{100} = 260 \times \frac{628 \times 10^2}{100} \\ = 1640 \text{ (瓦)} = 1.64 \text{ (千瓦)}$$

③ 电热体参数的确定: 因为炉子要求在氧化性气氛(例如空气)下能够工作到 1200°C , 因此可以选用表 1 中的铁铬铝 (Cr 27 Al 6) 合金电热丝做为发热体。由表 2 可查得这种电热丝在 1200°C 下的正常表面负荷为 1.25 ~ 2.00 瓦/厘米²。我们可取其下限值, 即有 $W = 1.25$ 瓦/厘米²。由电热丝的表面负荷 W 和总功率 P , 按公式(3)和(4)可计算出电热丝的直径 d 和长度 L 来。也可直接从图 2, 当 $P = 1.64$ 瓩时, 当 $W = 1.2$ 瓦/厘米² 直线交点, 查得电热丝长度 $L \approx 29$ (米), 此时对应的电热丝直径 $d = 1.5$ (毫米)。

(3) 炉体制作:

取直径 $d = 1.5$ 毫米的 Cr 27 Al 6 电热丝, 长度为 29 米。在距炉管一端为 10 厘米处开始缠绕炉丝。缠绕方法是: 先在电热丝一端留出 1 米长度, 将其对折并绞扭在一起, 以作为电源引线。然后用打结或另取一小段这种电热丝, 将炉丝固定在炉管上。29 米的电热丝, 两端各留出 1 米长度的引线, 所以实际在 $L = 40$ 厘米长度的加热区域上, 只有 27 米长的