

电阻炉加热元件的设计 及结构设计

西安变压器电炉厂

1974

内 容 提 要

这本书阐述了几种主要加热元件有关结构设计的各种问题。

介绍了加热元件电气参数的计算以及如何确定加热元件的单位表面容许功率。

该书还探讨了在快速加热时加热元件的计算特点。

本书可供从事加热元件计算和设计的工作者以及从事电阻炉的生产人员参考之用。

目 录

序	(1)
1. 金属加热元件电气参数的计算	(3)
2. 金属加热元件单位表面容许功率的确定	(9)
3. 金属加热元件使用寿命的估算	(37)
4. 各类金属加热元件的比较	(45)
5. 金属加热元件的计算程序	(56)
6. 简介几种金属加热元件的结构设计和制造	(67)
7. 二硅化钼加热元件的计算	(80)
8. 碳化硅加热元件的计算	(96)
附录	(104)
参考文献	(106)
中苏电热合金、高温合金对照表 (译者注)	(107)

序

根据有关资料，本书作者分析了最常用的几种加热元件形式并进行了必要的研究和实验工作，通过这些工作得出了设计加热元件的最佳方案，研究出供一般设计人员用的最通俗的电阻炉加热元件的快速算法且使计算的精确性大大提高。本书的初版就是这一工作成果的反映。

初版后的五年多时间里，这些工作的必要性得到了证实。目前，这一计算方法广泛地用于电炉的设计及使用中，一些研究单位的工作人员和有关专业的高等院校的学生以及中技校的学生同样也使用这一算法。

实践表明，所研究出的这一算法基本上能胜任电阻炉最普通形式的加热元件的简易快速工程计算任务。该算法适用于热传导主要是通过辐射进行的、砌有炉衬的且热能损失较小的炉子。

必须着重指出，正如在工作中已证明的那样，当给出一平方米炉衬所发出的功率时，加热元件在使用寿命、材料使用损耗及其它一些指标方面，线材波折形是最好的一种形式。在所有加热元件的截面形状当中，具有最大实体度的圆形截面是最理想的了。（实体度是指加热元件的截面积与其周长之比。）

由板材（成卷的）冲压而成的薄而宽的带材加热元件和其它展开截面（实体度较小）的加热元件是最不经济的。

再版时，作者在计算方法的运用方面作了较多的补充，如按不同炉型分别进行了计算并着重于提高计算的精确性。

这里，只是粗略地考虑了被加热工件的尺寸以及加热元件黑度的影响。

还补充介绍了碳化硅加热元件和二硅化钼加热元件的计算方法，以及被加热工件屏蔽的加热元件，例如辐射管式加热元件的计算方法。

本书列举了各种加热元件的设计并对其在电炉中的布置作了简要说明。

本书还阐述了所引用系数的物理实质、所立假设的依据以及计算方法的适用范围。这便于读者灵活地运用所述的计算资料。

该书还探讨了控制方法对加热元件工作的影响并对在计算中应如何考虑这一影响作了说明。另外还举了许多计算的例题，这些例子概括了在实际中所遇到的一些主要情况。

本书再版时在内容上作了重要的修改和补充，而且阐述详细。对于所给炉子可作如下计算：

1) 对金属加热元件、二硅化钼和碳化硅加热元件进行快速热计算和电气计算；

2) 对于加热元件的具体结构和材料的最佳方案，用比较方法进行快速选择；

3) 在加热元件的结构设计及其布置方面可获得一些基本的意见。

1. 金属加热元件电气参数的计算

为了进行电阻炉加热元件的电气计算，必须导出加热元件的电气参数、加热元件的单位表面功率及尺寸间的相互关系。

为推导这些关系，我们引用下述符号：

P ——加热元件功率，瓩；

U ——加于加热元件上的电压，伏；

R ——加热元件的电阻，欧姆；

ρ ——加热元件材料的热态电阻率，欧·毫米²/米；

l ——加热元件的长度，米；

S ——加热元件的截面，毫米²；

d ——线材加热元件的直径，毫米；

a, b ——带材加热元件截面的厚度和宽度，毫米；

Π ——加热元件截面的周长，毫米；

$F_{\text{元件}}$ ——加热元件的表面积，厘米²；

W ——加热元件的单位表面功率，瓦/厘米²；

利用已知的关系式：

$$R = \frac{U^2}{10^3 P}, \quad (1)$$

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (2)$$

$$W = \frac{P \cdot 10^3}{F_{\text{元件}}}. \quad (3)$$

由式 (1) 和 (2) 可得出加热元件的长度

$$l = \frac{U^2 S}{P \rho 10^8} \quad (4)$$

将值 $F_{\text{元件}} = 10 \Pi l$ 代入式 (3) 后, 得:

$$W = \frac{P \cdot 10^3}{10 \Pi l} = \frac{P \cdot 10^2}{\Pi l} \quad \circ$$

由此可确定加热元件的长度

$$l = \frac{P \cdot 10^2}{W \Pi} \quad (5)$$

取式 (4) 和 (5) 的 l 值相等, 可得到关系式:

$$\frac{U^2 S}{P \rho \cdot 10^8} = \frac{P \cdot 10^2}{W \Pi} \quad (6)$$

对于由圆形截面材料 (线材、棒材) 制成的加热元件而言,

$$\Pi = \pi d, \quad S = \frac{\pi d^2}{4} \quad \circ$$

将 S 和 Π 值代入式 (6) 后, 可确定加热元件材料的直径:

$$d = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 10^6 \rho P^2}{\pi^2 U^2 W}} \text{ (毫米)} \quad (7)$$

对于由矩形截面材料 (带材) 制成的加热元件 (当边比 $\frac{b}{a} = m$ 时),

$$\Pi = 2(b + a) = 2(ma + a) = 2a(m + 1),$$

$$S = ba = m^2。$$

将上式代入式(6)后,可得到带材的厚度:

$$a = \sqrt[3]{\frac{5 \cdot 10^4 \rho P^2}{m(m+1)U^2 W}} \text{ (毫米)}。 \quad (8) \quad \checkmark$$

由圆形截面材料制成的加热元件的长度

$$l = \frac{RS}{\rho} = \sqrt[3]{\frac{10PU^2}{4\pi\rho W^2}} \text{ (米)}。 \quad (9)$$

对于由矩形截面材料制成的加热元件,且当边比为 m 时,其长度为

$$l = \frac{RS}{\rho} = \sqrt[3]{\frac{2.5PU^2 m}{(m+1)^2 \rho W^2}} \text{ (米)}。 \quad (10)$$

根据以上所推导的关系式便可进行加热元件的电气计算。

为进行计算所必要的一些数据——横截面面积、表面积以及各种合金丝和合金带1米长的重量,列于附录1和2中。在附录3中列入了各种电阻合金的物理参数。

为了对圆形截面和边比 $m = \frac{b}{a} = 10$ 的矩形截面的加热元件进行概算和速算,制作了一些关于加热元件发出的功率、电压、截面、长度和单位表面功率的线解图(见附录4—11)。这些线解图是按最常用的电阻合金X15H60、X20H80、OX23Ю5A(ЭИ-595)和OX27Ю5A(ЭИ-626)绘制的。

这时,这里所指的加热元件是指在计算电压值下,一个或几个串联的加热元件。

电气计算的概算用线解图的应用说明参见图 1。

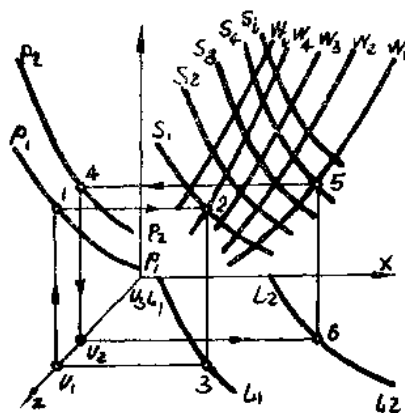


图1. 加热元件电气计算图

各坐标轴表示的下列值：

沿 x 轴 —— 表示在电压为 U_3 时的加热元件长度, l , 米；

沿 y 轴 —— 表示在同样的电压下的加热元件的功率 P ,
瓩；

沿 z 轴 —— 电压 U , 伏。

曲线 W_1 、 W_2 、 W_3 、 $\dots$ 、 W_i 相应于恒定的单位表面功率 W , 瓦/厘米²；

曲线 S_1 、 S_2 、 S_3 、 $\dots$ 、 S_i 相应于恒定的加热元件截面；

曲线 l_1 、 l_2 、 l_3 、 $\dots$ 、 l_i 相应于恒定的加热元件长度；

曲线 P_1 、 P_2 、 P_3 、 $\dots$ 、 P_i 相应于恒定的加热元件功率。

以下介绍线解图的应用实例 (图 1)。

例1. 已知：加热元件功率 P_1 , 瓩；电压 U_1 , 伏；单位表面容许功率 W_1 , 瓦/厘米²。

试求电阻丝的直径或电阻带的截面(边比 $m = 10$)和加热元件的长度。

从对应于给定电压 U_1 的点作垂线与给定功率 P_1 曲线相交(点 1)。从所得的点 1 作水平线与单位表面功率 W_4 相应的曲线相交(点 2)。

点 2 则是与加热元件截面 S_1 相对应的电阻丝直径或者是边比 $m = 10$ 的电阻带厚度。

从点 2 起, 向 x 轴方向作一条垂线与经 U_1 点所作的水平线相交, 得点 3。这一点对应的是加热元件的长度 l_1 , 米。

例 2. 已知: 加热元件功率 P_2 ; 单位表面容许功率 W_1 ; 电阻丝或电阻带的截面 S_4 。

试确定加热元件所需电压及其长度。

通过对应于单位表面功率 W_1 和截面 S_4 的点 5, 作水平线与给定的功率曲线 P_2 相交(点 4)。过点 4 作垂线与 z 轴相交于 U_2 点。这一点对应的则是加于加热元件上的电压。

为了确定加热元件的长度, 我们从 5 向 x 轴方向作一条垂线与从 U_2 点所作的水平线相交。

所得之点 6 就是加热元件的长度 l_2 , 米。

从所举的例子可以看出, 根据线解图可以对加热元件进行全部的电气计算。

运用线解图来比较各类加热元件的形式并选定最佳方案是特别有效。

本书还为具有各种电阻率和任意截面形状的加热元件的电气计算, 绘制出了通用线解图(参看附录 12 和 13)。

在这些线解图上, 在 z 轴上表示的是标称电压, 单位为伏, 即加于用电阻率等于 $1.0 \text{ 欧} \cdot \text{毫米}^2/\text{米}$ 的材料制成的加热元件上的电压。

实际电压等于标称电压乘以实际的电阻率, 即

$$U_{\text{实际}} = U_{\text{标称}} \cdot P_{\text{实际}}$$

或

$$U_{\text{标称}} = \frac{U_{\text{实际}}}{P_{\text{实际}}}$$

曲线 $W_{\text{标称}}$ 对应的是恒定的标称单位表面功率。

可把同圆形截面积相等的加热元件的单位表面功率当作计算加热元件的标称单位表面功率。因此, $W_{\text{标称}} = P/\pi d l$ 和 $W_{\text{实际}} = P/\pi l$ 。

将这些式子代入后, 可得到如下的关系式

$$W_{\text{实际}} = W_{\text{标称}} \frac{\pi d}{\pi}$$

将值 $d = \sqrt{4S/\pi}$ 代入所得公式之后, 便具有如下形式

$$W_{\text{实际}} = W_{\text{标称}} \frac{\pi \sqrt{\frac{4S}{\pi}}}{\pi} = 3.54 \sqrt{\frac{S}{\pi}} W_{\text{标称}}$$

或者

$$W_{\text{标称}} = \frac{\pi}{3.54 \sqrt{S}} W_{\text{实际}}。$$

所有曲线 S 对应的是加热元件恒定的截面积, 从左侧标示加热元件截面积的值, 而从右侧标示加热元件等值截面的直径。

通用线解图的其余曲线完全与图1中所示的曲线相符合。

确定单位表面功率的方法将在 §2—3 节内详述。它是取决于各种加热元件材料的电阻带和电阻丝按氧化程度所要求的使用寿命、加热元件的截面尺寸和形状以及各类结构形式的几何关系。

2. 金属加热元件单位表面容许功率的确定

在给定了被加热工件的温度及其它条件相同时，加热元件的温度是由其每单位表面（厘米²）发出的功率（瓦）来决定的，而加热元件按氧化程度的使用寿命是与这个温度有关的。

因此在加热元件的计算中单位表面功率是最重要的原始数据。为了确定这个参数，我们在下面引入一个理想加热元件的概念。所谓理想加热元件指的是这样一种加热元件，即在炉衬不参与热交换（视热损耗等于0）的条件下，它与工件构成两个完全平行的无限大平面。对于这种加热元件，在给定的加热元件温度下，其单位表面功率 $W_{\text{理想}}$ 是与被加热工件的表面温度有关的，可按下式计算

$$W_{\text{理想}} = \frac{C_{\text{折合}} \left[\left(\frac{T_{\text{元件}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{工件}}}{100} \right)^4 \right]}{8600} \quad (\text{瓦/厘米}^2), \quad (11)$$

式中 $T_{\text{元件}}$ ——加热元件温度，°K，
 $T_{\text{工件}}$ ——工件的表面温度，°K，
 $C_{\text{折合}}$ ——工件的折合辐射系数，千卡/米²·时·(°K)⁴，

$$C_{\text{折合}} = \frac{4.9}{\frac{1}{\varepsilon_{\text{工件}}} + \frac{1}{\varepsilon_{\text{元件}}} - 1}, \quad (12)$$

式中， $\varepsilon_{\text{元件}}$ 、 $\varepsilon_{\text{工件}}$ ——加热元件材料和工件相应的黑度。

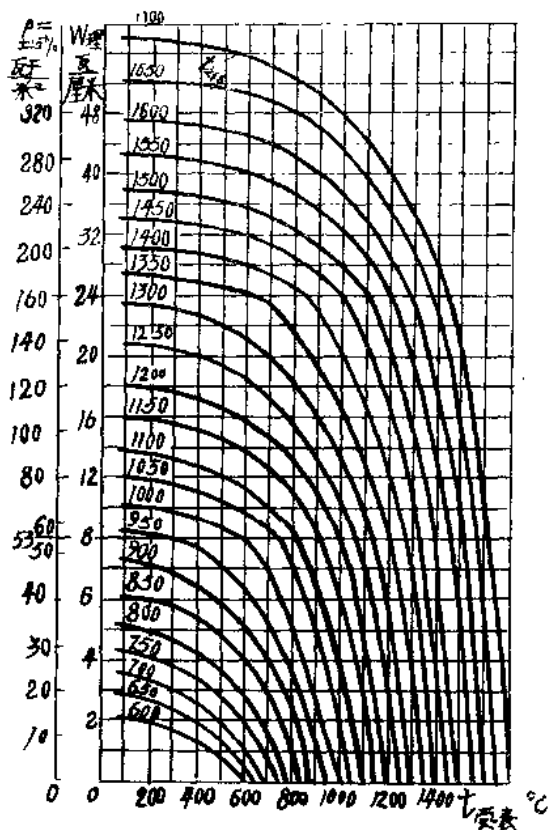


图2. 理想加热元件的单位表面功率 $W_{理想}$ 值和1平方米炉衬上所分布的概算功率 P 值与受热表面温度 $t_{受表}$ 和加热元件的温度 $t_{元件}$ 之间的关系曲线。对于下列呈自由辐射状的加热元件，当 $\alpha_r = 1$ 、 $\alpha_c = 1$ 和 $\alpha_p = 1$ 时，放置在搁板上的螺旋形加热元件和波折形的线材加热元件及带材加热元件， P 值是给定的。

图 2 所示曲线表示的是：当 $\varepsilon_{\text{元件}} = \varepsilon_{\text{工件}} = 0.8$ ，即 $C_{\text{折合}} = 3.3 \text{ 千卡/米}^2 \cdot \text{时} \cdot (^\circ\text{K})^4$ 时，理想加热元件的单位表面功率与工件和加热元件的温度间的关系。曲线之所以在这一 $C_{\text{折合}}$ 值来绘制，是因为在计算实际的炉子时大多数情况下我们是取工件和加热元件的 $\varepsilon = 0.8$ 。

当加热工件的折合辐射系数不为 $3.3 \text{ 千卡/米}^2 \cdot \text{时} \cdot (^\circ\text{K})^4$ 时，理想加热元件的单位表面功率同样可在图 2 上所示曲线查得，但要考虑到折合辐射系数 $C_{\text{折合}}$ 对 W 的影响，须用系数 α_c 进行修正。当 $C_{\text{折合}} = 3.3 \text{ 千卡/米}^2 \cdot \text{时} \cdot (^\circ\text{K})^4$ 时， $\alpha_c = 1$ 。

我们来研究当加热工件被整个片状加热元件包围时，例如在圆筒形电炉中的情况（图 3）。在这种电炉中只不过是加热元件安装的表面直径比被加热工件直径大些。所以我们仍取 $\varepsilon_{\text{元件}} = \varepsilon_{\text{工件}} = 0.8$ 。

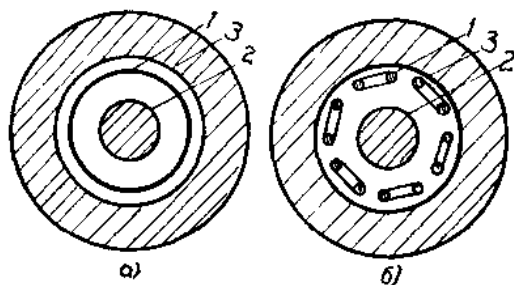


图 8. 圆筒形电炉示意图（剖面图）。

a) — 具有整体片状加热元件的圆筒形电炉；

b) — 具有材料波折形加热元件的圆筒形电炉。

1) — 加热元件； 2) — 被加热工件； 3) — 炉衬。

在这种情况下

$$W = \frac{C_{\text{折合}} \frac{F_{\text{工件}}}{F_{\text{元件}}} \left[\left(\frac{T_{\text{元件}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{工件}}}{100} \right)^4 \right]}{8600} \quad (\text{瓦/厘米}^2), \quad (13)$$

式中 $F_{\text{工件}}$ ——工件的表面积，米²，

$F_{\text{元件}}$ ——加热元件的表面积，在 给 定 的 情 况 下 等 于 被 加 热 元 件 占 有 的 炉 墙 表 面 积 $F_{\text{炉墙}}$ ，米²。

在给定情况下

$$C_{\text{折合}} = \frac{4.9}{\frac{1}{\epsilon_{\text{工件}}} + \frac{F_{\text{工件}}}{F_{\text{元件}}} \left(\frac{1}{\epsilon_{\text{元件}}} - 1 \right)} \quad (14)$$

这个单位表面功率同样可在图 2 所示曲线上查得，但要考虑到工件的尺寸对单位表面功率的影响须用系数 α_F 进行修正。

✓ 在大多数情况下由线材和带材制成的实际加热元件与理想加热元件不同的地方在于：前者的辐射热不是全部地到达工件，而只有部分辐射热到达相邻加热元件和炉衬；因此可以认为，不是实际加热元件本身全部表面积 $F_{\text{元件}}$ 所发出的热量辐射到工件上，而是某个假设的有效表面积 $F_{\text{有效}}$ 。表面积为 $F_{\text{元件}}$ 的实际加热元件可以用等效的理想加热元件来代替，其理想加热元件功率从各个方向辐射到工件上，在同样温度下，后者的表面积要小些。可把理想加热元件的这个小的表面积看作是实际加热元件的有效表面积 $F_{\text{有效}}$ 。

有如下等式

$$WF_{\text{元件}} = W_{\text{理想}}F_{\text{有效}},$$

由此得

$$W = W_{\text{理想}} \frac{F_{\text{有效}}}{F_{\text{元件}}} \quad (15)$$

(15) 式是在当没有热损失的情况下是正确的（对于砌有炉衬的电炉，热损失可忽略不计）。

利用所得到的实际的和理想的加热元件表面功率间的关系式以及理想加热元件的单位表面功率曲线，可求得实际的表面功率 W 。为此我们可以在式 (15) 中引入下面的关系式

$$\frac{F_{\text{有效}}}{F_{\text{元件}}} = \alpha_{\text{有效}} \alpha_r,$$

式中 $\alpha_{\text{有效}}$ ——给定加热元件形式的有效幅射系数，

α_r ——间距系数。

当考虑了幅射折合系数 $C_{\text{折合}}$ 和工件尺寸 $F_{\text{工件}}$ 的影响时，实际的加热元件单位表面功率可按 (16) 式求出：

$$W = W_{\text{理想}} \alpha_{\text{有效}} \alpha_r \alpha_c \alpha_p, \quad (16)$$

式中 α_c ——考虑 W 与 $C_{\text{折合}}$ 有关的一个系数。

表面功率 $W_{\text{理想}}$ 可按图 2 上所示曲线查得。

当 α_r 、 α_c 和 α_p 等于 1 时，除理想加热元件的单位表面功率 $W_{\text{理想}}$ 之外，由图 2 可对加热元件自由辐射形式的 1 米² 炉衬上所分布的最大功率的近似值 P (瓩/米²) 与受热表面温度和加热元件温度间的关系作一初步的估计。

以下所研究的各种自由辐射的加热元件形式，其单位功率值均可精确到 $\pm 15\%$ 以内。

让我们来研究一下每个 α 系数的物理实质以及它们对加热元件单位表面功率的影响。

当在加热元件结构上允许有最小相对匝间距离时，即在加热元件最稠密布置的情况下可求出任何一种加热元件形式的系数 α 有效。

我们把线材波折形电阻丝线间距与线径之比 e/d 、带材波折形电阻带的带间距与带宽之比 e/b 和线材螺旋形电阻丝的螺距与线径之比 t/d 称之为表征给定元件形式辐射效率的

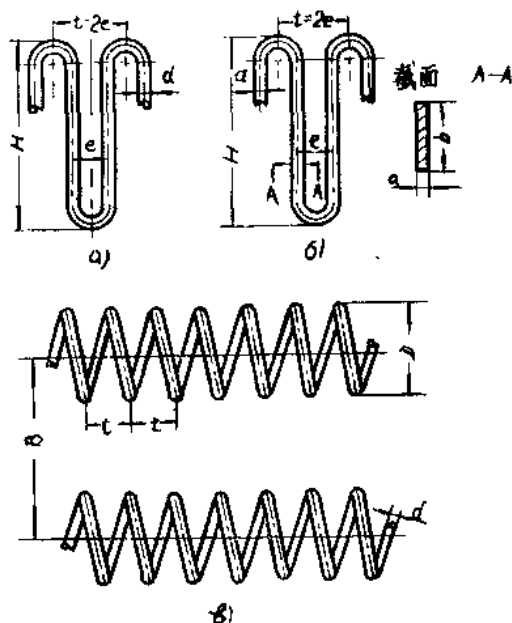


图4. 标注有主要几何尺寸的线材加热元件和带材加热元件的简图。

- a) — 线材波折形加热元件；
- b) — 带材波折形加热元件；
- в) — 螺旋形加热元件。