

电炉真空系统的 计算与设计

(435)

图书馆藏书

天津电炉厂

电 炉 真 空 系 统 的
计 算 与 设 计

天 津 电 炉 厂 技 术 组 译

天 津 电 炉 厂

1 9 7 2

毛主席语录

外国一切好的经验，好的科学技术，我们都要吸收过来，为我们所用。拒绝向外国学习是不对的。当然，迷信外国认为外国的东西都是好的，也是不对的。不论是迷信苏联，还是迷信西方，都不对。正确的态度应当是尊重科学，破除迷信。

中国人民有志气，有能力，一定要在不远的将来，赶上和超过世界先进水平。

鼓足干劲，力争上游，多快好省地建设社会主义。

目 录

译者的话	2
第一章 理论基础	4
第二章 电炉真空系统计算方法	17
第三章 真空设备	40
1. 旋转真空泵	40
2. 机械增压泵	48
3. 蒸汽喷射泵	49
4. 油蒸汽返流及其防止方法	66
5. 冷阱	67
6. 真空阀门	70
7. 真空机组	74
8. 过滤器	76
9. 补偿器	78
10. 消除漏气的方法、检漏仪	79
第四章 电炉真空系统	83
第五章 电炉真空系统计算例题	87
1. 感应熔炼炉真空系统计算例题	87
2. 具有陶瓷炉衬的电阻炉真空系统计算例题	93
3. 熔炼钛的电弧炉真空系统计算例题	96
4. 电子轰击熔炼炉真空系统计算例题	97
参考文献	108

译 者 的 话

真空电炉由于它具有炉温高，生产率高，产品质量高，维护、运行费用低以及操作方便安全等优点，所以目前国内外正在日益广泛普及。

目前我国已使用的各种类型真空炉有：真空熔炼炉、真空热处理炉、真空脱气炉、真空烧结炉和真空钎焊炉等。这些电炉已成为近代的空间技术、原子能技术和电子技术所不可缺少的设备。

真空系统是真空电炉的关键部份，它负责保证电炉具有工艺所要求的真空度。这样，真空系统的计算和设计也就成为设计和制造真空炉的部门所着重关注的问题。

电炉真空系统的计算对于合理选用真空设备有着头等重要的意义。如泵的能力选用不足将导致工艺过程增长并使炉内压强升高，因而有可能使被处理的材料质量变坏；相反，若真空系统能力选用过大，炉子结构就要复杂，这样不仅使成本显著提高，并且使运行、维护费用也大为增加。

鉴于目前国内尚缺真空系统设计与计算方面专著的情况，我们遵照毛主席“洋为中用”的教导，将俄文版“电炉真空系统设计与计算”一书译出。

本书扼要地叙述了计算电炉真空系统所必需的基础理论，列举了各种类型电炉真空系统的例题，并介绍了各种真空设备的特性、选用方法和在真空炉上合理配置的原理图。可供有关工厂、学校和科研机关的工程技术人员参考。

译者深感遗憾的是书中所叙述的真空设备均系苏联产品。为弥补这一缺欠，我们拟另编介绍相应的国产真空设备的有关资料，以后将

同读者见面。

译文初稿1968年曾复制一部份，以供急需。现经校核，重新印行，以满足广大读者的需要。译文疏误之处，欢迎读者批评指正。

天津电炉厂 技术组

1973年元月

第 一 章 理 论 基 础

根据通过真空系统任意截面的流量 Q 保持不变的条件进行真空系统的计算。

为了阐明影响气体在真空系统中通过的各种因素，我们解释一些术语：

管道的通导能力* C 是指在管道两端有一定压差时流过该管道的气体流量 Q 。

$$C = \frac{Q}{P_1 - P_2} \quad (1)$$

式中： P_1 —管道入端压强；

P_2 —管道出端压强。

抽速 S 是指单位压强下，单位时间内通过管道截面的气体量：

$$S = \frac{Q}{P} \quad (2)$$

$$\text{泵的抽速 } S_H = \frac{Q_H}{P_H}$$

有效抽速 S_{eff} 是指从容器通过具有通导能力 C 的管道的抽气速度。

经过不复杂的换算，就可确定取决于泵抽气速和管道通导能力的有效抽速：

~~~~~  
\*通导能力也可简称通导 — 译者。

$$\frac{1}{S_{\text{ЭФ}}} = \frac{1}{C} + \frac{1}{S_H} \quad (3)$$

从公式(3)得出有效抽速和为选择真空泵而应确定的泵的抽速之间, 是通过通导能力  $C$  而联系起来的。通导能力  $C$  的数值取决于气流的状态、温度、气体的种类和管道的形状等等。

研究一下当改变压强时, 通过确定管道的气流状态将如何改变。

当高压强和大的气体流速时, 发生气体粒子杂乱的混合, 这种状态叫做湍流。随着压强和流速的降低, 气体粒子杂乱的混合逐渐地被整齐的直线运动所代替, 气流速度由管壁到管中心平稳地增加, 在这种情况下对气流性质的主要影响是气体的粘滞性, 所以这种状态叫做粘滞流。

压强进一步降低时, 气体数量减少, 因此分子的自由行程增大。当分子平均自由行程长度等于或大于容器或管道直径时, 分子本身之间相互碰撞比它和壁的碰撞要少。分子相互之间的碰撞或然率少于分子同壁的碰撞或然率。因此气流的性质又发生改变, 分子之间彼此独立地在管道中移动, 这种气流状态叫做分子流。必须指出, 不是急剧地由一种气流状态过渡到另一种气流状态, 而是存在着一个过渡状态的范围。

对每一种气流状态, 存在着完全确定的管道通导能力与它的几何形状及气体物理参数的关系。因为在真空炉中, 气流的湍流状态只存在于开始抽气时期, 通常持续几分钟, 所以以后不再研究气体的湍流状态, 主要的注意力将集中于粘滞流、分子流和过渡状态。

首先必须决定在何种边界条件下, 通过管道的气流为粘滞流。正如上所述, 由湍流状态过渡到粘滞流状态取决于分子运动的整齐性。



确定这个过渡的准则通常用雷诺数来表示，雷诺数由不名比例确定：

$$Re = \frac{Dv\rho}{\eta} \quad (4)$$

式中：  $D$  — 管道直径；

$v, \rho, \eta$  — 相应于气体的速度、密度和粘滞性。

经实验证明，稳定粘滞流状态只在  $Re < 1200$  的条件下存在。以单位时间内气体的消耗和压强代替速度和密度，经不复杂的换算可得到雷诺数的表示式：

$$Re = \frac{Q}{89D} ; \quad 1200 > \frac{Q}{89D}$$

由此  $Q < 1200 \times 89D$ ;

$$Q \leq 1 \times 10^5 D$$

式中  $Q$  — 微升/秒， $D$  — 厘米。

这样，具有粘滞流状态的压强的上限由关系式  $Q \leq 1 \times 10^5 D$  来决定。欲确定  $20^\circ\text{C}$  空气通过长圆管的通导，用下式是正确的：

$$C = 0.182 \frac{D^4}{L} P \quad (5)$$

式中  $C$  — 通导，升/秒；

$D$  和  $L$  — 管道的直径和长度，厘米；

$P$  — 管内平均压强，微米汞柱。

下面列出粘滞流在  $20^\circ\text{C}$  情况下，其它气体通导能力对空气通导能力的比值：

| 气体  | $\frac{C_{\text{气体}}}{C_{\text{空气}}}$ |
|-----|---------------------------------------|
| 氩   | 2.1                                   |
| 氯   | 0.93                                  |
| 水蒸气 | 1.9                                   |
| 氟   | 0.58                                  |
| 氮   | 1.04                                  |

当压强降低，分子平均自由程与管道直径可比较时，公式(5)不再正确。公式(5)说明粘滞流状态的通导，如果在通导计算中允许误差不大于10%的话，就被採用。据此，粘滞流状态的下限按下列关系确定： $PD > 500$  微米汞柱×厘米。

分子流状态存在于高真空范围内，即当分子自由程长度大于管道直径时，分子流状态的界限按下列关系决定：

$$PD < 15 \text{ 微米汞柱} \times \text{厘米}$$

在这种状态下，管道的通导不取决于压强。对于圆形长管道，在分子流和20°C场合通导的公式具有下列形式：

$$C = 12.1 \frac{D^3}{L} \quad (6)$$

式中  $C$  — 升/秒  $D$  和  $L$  — 厘米。

当气体由具有大截面的容器到小截面的容器时，对短管必须考虑“隔膜”（ДИАФРАГМИРОВАНИЕ）。这种场合总的通导按下式确定：

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_{TP}} + \frac{1}{C_D} \quad (7)$$

在分子流状态下，“隔膜”的通导按下式决定：

$$C_D = \frac{11.6A}{1 - \frac{A}{A_0}} \quad (8)$$

式中  $A$  — 隔膜面积；

$A_0$  — 与隔膜邻接的容器截面，气体由该截面出来经过隔膜。对于圆形管道：

$$C_D = \frac{9.11D^2}{1 - \left(\frac{D}{D_0}\right)^2} \quad (9)$$

式中： $D$  — 管道或隔膜的直径；

$D_0$  — 容器的直径，气体由该容器流到管道。

这样，分子流状态下短管的通导：

$$C = \frac{12.1 \frac{D^3}{L}}{1 + 1.33 \frac{D}{L} \left(1 - \frac{D^2}{D_0^2}\right)} = 12.1 \frac{D^3}{L} a \quad (10)$$

为简化计算，将  $a$  与  $\frac{L}{D}$  的相依关系示于表1和图1〔文献1〕。

在同一表上还列出由克罗森研究气体在短管内流动的所有现象而得到的  $a$  值，其精度达1%〔文献2〕。

由列出的数值可见，当  $\frac{L}{D} \geq 100$  时  $a=1$ 。可是对于真空系统的计算，10%的精度已足够正确，所以当  $\frac{L}{D} \geq 20$  时，隔膜系数  $a$  可以略去不计。

分子流情况下，在很长的管道上，弯曲不发生大的阻力。在这种场合，建议计算时把带角度管道的轴向长度增大，增大值为  $D$  到  $1.33D$ 。

~ 8 ~

表1

| L/D  | a     | a     |
|------|-------|-------|
|      | 根据克罗森 | 根据公式  |
| 0.05 | 0.036 | 0.036 |
| 0.08 | 0.055 | 0.056 |
| 0.1  | 0.068 | 0.070 |
| 0.2  | 0.13  | 0.13  |
| 0.4  | 0.21  | 0.23  |
| 0.6  | 0.28  | 0.31  |
| 0.8  | 0.30  | 0.38  |
| 1.0  | 0.38  | 0.43  |
| 2    | 0.54  | 0.60  |
| 4    | 0.70  | 0.75  |
| 6    | 0.77  | 0.82  |
| 8    | 0.81  | 0.86  |
| 10   | 0.84  | 0.88  |
| 20   | 0.91  | 0.94  |
| 40   | 0.95  | 0.97  |
| 60   | 0.97  | 0.98  |
| 80   | 0.98  | 0.98  |
| 100  | 1     | 1     |

如果连续地有几个弯曲，那么：

$$L_{\text{总}} = L_{\text{直线}} + (1 \sim 1.33)nD \quad (11)$$

十分明显，弯曲最大的影响出现在经常被采用在炉子高真空管道的短管上。下面列出 20 °C 分子流状态的其它气体的通导与空气通导之比：

| 气 体 | $C_{\text{气体}}/C_{\text{空气}}$ |
|-----|-------------------------------|
| 氦   | 3.8                           |
| 氢   | 2.7                           |
| 水蒸汽 | 1.3                           |
| 氟   | 1.2                           |
| 氯   | 1.01                          |

我们最关心的是分子流状态时，通导与温度变化的关系。下面列出分子流状态在某些温度下通导与室温下通导之比：

| 温度 $^{\circ}\text{C}$ | $C_t/C_{20}$ |
|-----------------------|--------------|
| -187                  | 0.55         |
| 0                     | 0.96         |
| 100                   | 1.2          |
| 1000                  | 2.1          |
| 2000                  | 2.7          |
| 3000                  | 3.46         |

隔膜系数  $a$

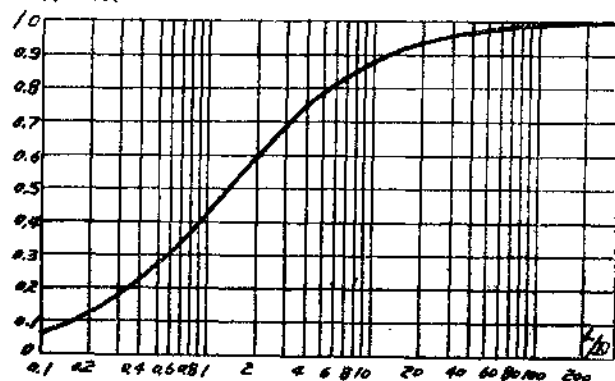


图1  $a$  与  $L/D$  的关系曲线

通导随着温度的提高而增大。这种现象的物理意义在于随着温度的提高，气体分子运动速度增大。

除了圆管道之外，有时遇见採用其它形状：矩形，环形，扁缝形等等。

下面导出了某些其它形状截面的管道，在分子流状态时的通导计算公式〔文献1〕。

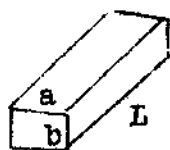


图2 矩形截面的管道

a) 矩形截面管道的通导(图2)：

$$G = 30.9 \frac{a^2 b^3}{(a+b)L} K (\text{升/秒}) \quad (12)$$

数值  $K$  取决于  $\frac{b}{a}$ ：

|       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $b/a$ | 1     | 0.667 | 0.500 | 0.333 | 0.200 | 0.125 | 0.100 |
| $K$   | 1.108 | 1.126 | 1.151 | 1.198 | 1.297 | 1.400 | 1.444 |

B) 扁缝形截面管道的通导(图3)：

$$G = 30.9 \frac{ab^3}{L} K (\text{升/秒}) \quad (13)$$

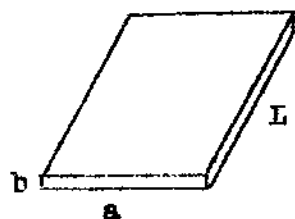


图3 扁缝形截面的管道

当  $a \gg b$  时

$K$  取决于  $L/b$  :

| $L/b$ | 0.1   | 0.2   | 0.4  | 0.8  | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 10   | 大于<br>10                  |
|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|---------------------------|
| $K$   | 0.036 | 0.069 | 0.13 | 0.22 | 0.26 | 0.40 | 0.52 | 0.60 | 0.67 | 0.74 | $\frac{3}{8} \frac{L}{b}$ |

这样，对长的管道

$$C = 27 \frac{ab}{L} L \frac{L}{b} \quad (\text{升/秒}) \quad (14)$$

B) 圆环形截面管道的通导 (图4)。

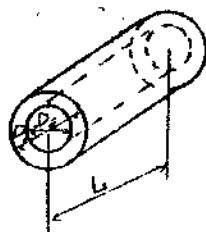


图4 环形截面的管道

$$C = 12.1 \frac{(D_1 - D_2)^2 (D_1 + D_2)}{L} K \quad (\text{升/秒}) \quad (15)$$

式中  $K$  取决于  $\frac{D_2}{D_1}$  :

|           |   |       |       |       |       |       |
|-----------|---|-------|-------|-------|-------|-------|
| $D_2/D_1$ | 0 | 0.259 | 0.500 | 0.707 | 0.866 | 0.966 |
| K         | 1 | 1.072 | 1.154 | 1.254 | 1.43  | 1.675 |

所有列举的情况，对短管均应考虑当由大直径向小直径过渡时的隔膜系数。

在计算真空系统时，必须考虑过渡状态，在此状态下有粘滞流和分子流的特征，即同时发生分子之间和分子与管壁之间的碰撞。

正如上述，过渡状态上限的关系是：

$$P D < 500 \text{ 微米汞柱} \times \text{厘米}$$

下限的关系是：

$$P D > 15 \text{ 微米汞柱} \times \text{厘米}$$

在这个范围内克努特森公式〔文献1〕是正确的，对20°C空气具有下列形式：

$$C = 12.1 \frac{D^3}{L} \left[ \frac{1 + 0.271 DP + 0.00479 (DP)^2}{1 + 0.316 DP} \right] \quad (16)$$

$$\text{或 } C = 12.1 \frac{D^3}{L} K \quad (17)$$

为简化按这个公式计算通导，图5中给出K与PD的关系曲线〔文献1〕。

由分析公式(16)可见，当乘积PD很小时，可以忽略K值，则得到分子流状态时的通导的公式。当压强较大时，可以忽略K的表示式中小的成分，那时得到粘滞流状态时的通导公式。



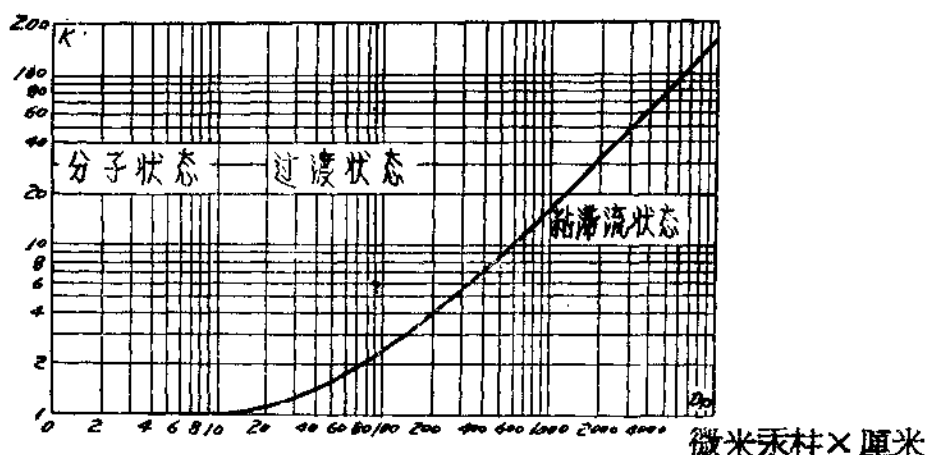


图5 系数K与D P的关系

这样，可以写出计算任意长度圆管道在分子流、过渡状态和粘滞流状态时通导的综合公式：

$$C = 12.1 \frac{D^3}{L} K a$$

为简化计算，作出1米长圆管道的通导与直径和压强的关系曲线（图6），作曲线时没有考虑隔膜系数。借助于给出的曲线就能确定任意长度管道的通导。方法是根据图6上的曲线，确定1米长管道的通导，而后将得到的值除以管道的总长度。如果研究短管的通导，则得到的总通导 $C_{TP}$ 立乘以由图1曲线决定的隔膜系数。

至此，从理论上研究了计算真空管道通导的各种情况，但是理论上足够正确的计算仅限于最简单的场合；对于真空系统的很多部件进行理论计算很困难，因此，通导在试验中确定。某些真空系统元件如冷阱、过滤器的通导将在叙述它们结构时指出。