

高等学校教学用书

# 冶金单元设计

**G**AODENG

XUEXIAO

JIAOXUE

YONGSHU

冶金工业出版社

高等学校教学用书

# 冶金单元设计

北京科技大学 范光前 主编

冶金工业出版社

(京)新登字036号

**图书在版编目 (CIP) 数据**

冶金单元设计/范光前主编.-北京:冶金工业出版社, 1994.10

高等学校教学用书

ISBN 7-5024-1503-3

I.冶… II.范… III.冶金-设计-高等学校-教学参考资料 IV.TF01

中国版本图书馆CIP数据核字 (94) 第02820号

出版人 卿启云 (北京沙滩嵩祝院北巷39号, 邮编100009)

怀柔县东茶坞印刷厂印刷; 冶金工业出版社出版; 各地新华书店发行

1994年10月第1版, 1994年10月第1次印刷

787mm×1092mm 1/16; 17.5印张; 415千字; 266页; 1-1700册

10.50元

## 前 言

冶金单元设计是应用传输现象（即动量、热量和质量传递）来研究冶金生产的物理操作及其设备的合理设计。它包括设备和工艺参数的选择以及优化设计等。在化学工程中，常称其为单元操作与设备。我们所指的设计乃强调由一种技术思想过渡到生产实践是一种创造性的设计过程，它是以传递原理、现代测试技术和现代计算技术为基础的学科。

本书以北京科技大学多年使用的讲义为基础编写的，主要介绍工业加热、流态化、气力输送、气体输送、真空系统、冷却系统、搅拌、凝固和连铸等内容。第一、二、七章由刘述临编写，第三、四、五、六章由范光前编写，第八、九章由李士奇编写，全书由范光前任主编。武汉钢铁学院严友梅、华东冶金学院朱凯荪北京科技大学沈颐身等教授审阅了本书初稿，提出了许多宝贵意见，谨致以衷心的感谢。

1979年，北京钢铁学院（现北京科技大学）为研究生开设了“单元设计”课程，继而又为本科生开设此课，经过十余年的教学实践，教材体系基本成型。这次以《冶金单元设计》为书名正式出版，尚属首次，希望能对本课程的发展和完善起到推进作用。本书可作为高等学校教材，还可供化工、冶金等工程技术人员参考。由于我们的经验和学识水平的不足，书中缺点和错误在所难免，欢迎读者给予批评指正。

编者  
1993年12月

EAL51106

## 符 号

|            |                                                    |
|------------|----------------------------------------------------|
| $A$        | 面积                                                 |
| $A_j$      | 经验常数                                               |
| $A^*$      | 临界截面积                                              |
| $a$        | 音速, 单位床层体积的颗粒表面积, 凝固平方根定律常数, 二次枝晶常数, 或导热系数随温度变化的常数 |
| $a_j'$     | 第 $j$ 种溶质对液相线温度影响系数                                |
| $a_*$      | 临界音速                                               |
| $B$        | 膨胀比, 或常数                                           |
| $b$        | 流化床长度或系数, 凝固平方根定律常数, 二次枝晶常数, 导热系数随温度变化的常数, 或凝固坯壳厚度 |
| $C$        | 系数、结晶系数、或流导                                        |
| $C_c$      | 溶质的初始浓度                                            |
| $C_d$      | 短管道流导或小孔摩擦阻力系数                                     |
| $C_D$      | 曳力系数                                               |
| $C_h$      | 孔、眼的流导                                             |
| $C_l$      | 长管道流导                                              |
| $C_j$      | 第 $j$ 种溶质浓度                                        |
| $C_j^0$    | 第 $j$ 种溶质原始浓度                                      |
| $C_L$      | 溶质在液相中的浓度                                          |
| $C_P$      | 气体热容                                               |
| $C_{PE}$   | 等价热容                                               |
| $C_{ps}$   | 颗粒体的热容                                             |
| $C_s$      | 溶质在固相中的浓度, 或金属(固体)的热容                              |
| $C_w$      | 边界效应修正系数                                           |
| $D$        | 管道直径, 或流化板的直径                                      |
| $D_1, D_2$ | 连铸坯的半厚度和半宽度                                        |
| $D_m$      | 分子扩散系数                                             |
| $D_B$      | 气泡当量直径                                             |
| $D_c$      | 流态化床当量直径                                           |
| $D_D$      | 分子扩散系数, 或扩压器喉口直径                                   |
| $D_w$      | 水平管直径                                              |
| $d$        | 直径                                                 |
| $d_0$      | 喷嘴喉口直径                                             |
| $d_i$      | 喷嘴入口直径                                             |
| $d_o$      | 喷嘴出口直径                                             |

|            |                                    |
|------------|------------------------------------|
| $d$        | 喷管出口直径                             |
| $d_r$      | 小孔直径                               |
| $d_s$      | 颗粒直径                               |
| $d_{II}$   | 二次枝晶臂间距                            |
| $E_l$      | 液相的质量内能                            |
| $E_s$      | 固相的质量内能                            |
| $\Delta E$ | 凝固过程单位质量内能的变化                      |
| $F$        | 颗粒夹带速率, 或铸件表面积                     |
| $F_g$      | 运动方向上物料质量分力                        |
| $F_r$      | 弗路德准数                              |
| $F_R$      | 作用于物料的空气阻力                         |
| $F_{r_t}$  | 终端速度的弗路德准数                         |
| $f_l$      | 质量液相率                              |
| $f_s$      | 质量固相率                              |
| $G$        | 气体质量流量                             |
| $G_a$      | 空气质量流量                             |
| $G_A$      | 系统漏气量                              |
| $G_b$      | 冷却水耗量                              |
| $G_{ch}$   | 颗粒临界质量流量                           |
| $G_h$      | 混合气体质量流量                           |
| $G_k$      | 抽吸空气量                              |
| $G_s$      | 颗粒的质量流量                            |
| $G_z$      | 被抽吸的水蒸汽的质量流量                       |
| $G_{20}$   | 20℃纯空气流量                           |
| $g$        | 重力加速度                              |
| $g_l$      | 体积液相率                              |
| $g_s$      | 体积固相率                              |
| $H$        | 热焓, 流化床自由空域高度, 钢液深度, 或何氏系数         |
| $H_0$      | 谐时性准数                              |
| $H_f$      | 凝固过程的焓变                            |
| $H'_{i,j}$ | 在 $x=x_i$ , $y=y_j$ 和 $z=z'$ 处的热焓值 |
| $h$        | 水平管道长度、铸件表面综合传热系数, 或物质比热焓          |
| $\bar{h}$  | 平均表面传热系数                           |
| $h_0$      | 在基准温度 $T_0$ 的物质比热焓                 |
| $h_r$      | 传热系数, 或提升液体净高度                     |
| $h_{Rj}$   | 第 $j$ 段二冷的平均表面综合传热系数               |
| $h_s$      | 假想的中性面与金属面的传热系数, 或吹气口的净埋入深度        |
| $h_m$      | 假想的中性面与模子间的传热系数                    |
| $j_d$      | 传质因子                               |

|                     |                                                          |
|---------------------|----------------------------------------------------------|
| $K$                 | 局部阻力系数, 绝热系数, 传质系数, 或铸造经验常数                              |
| $K_0$               | 平衡分配系数                                                   |
| $K_j$               | 第 $j$ 种溶质平衡分配系数                                          |
| $K_1$               | 比例系数, 修正系数, 或弯管最大和最小的速度比                                 |
| $K_2, K_3$          | 比例系数, 修正系数                                               |
| $K_m$               | 摩尔质量修正系数, 或模子材料的导热系数                                     |
| $K_n$               | 喷射泵平均压缩比                                                 |
| $K_s$               | 抽速损失系数, 或金属 (固体) 的导热系数                                   |
| $K_N$               | 吸嘴压强比例系数                                                 |
| $K_{eff}, K'_{eff}$ | 液相和两相区中的等效导热系数                                           |
| $k$                 | 波尔兹曼常数                                                   |
| $L_0$               | 理论空气消耗量                                                  |
| $L_n$               | 实际空气消耗量                                                  |
| $\Delta L$          | 过剩空气量                                                    |
| $L$                 | 射流有效长度, 或床层高度                                            |
| $L_m$               | 固定床高度, 或连铸机的冶金长度                                         |
| $L_{mf}$            | 临界流化床层高度                                                 |
| $L_f$               | 流态化床层高度, 或凝固潜热                                           |
| $Ly$                | 李森科准数 $Ly = \frac{\rho_l u_l^2}{(\rho_s - \rho_l) \eta}$ |
| $M$                 | 马赫数, 分子量或热模系数                                            |
| $m$                 | 体积喷射比, 或质量                                               |
| $N$                 | 分布板开孔数, 或提升泵的有效功率                                        |
| $N_K$               | 轴功率                                                      |
| $N_E$               | 风机功率                                                     |
| $Nu$                | 努塞尔准数                                                    |
| $N_x, N_y$          | 在 $x$ 、 $y$ 方向上的差分网格数                                    |
| $n$                 | 质量喷射比, 水平管支数, 二次枝晶参数, 或浆叶转数                              |
| $n_d$               | 蒸汽分子密度                                                   |
| $P$                 | 压强, 或搅拌功率                                                |
| $P_s$               | 功率                                                       |
| $P_c$               | 出口压强                                                     |
| $P_e$               | 波利克数                                                     |
| $P_f$               | 真空室极限真空度                                                 |
| $P_N$               | 泵的最大排气压强                                                 |
| $P_p$               | 泵的额定压强                                                   |
| $Pr$                | 普朗特准数                                                    |
| $P_t$               | 风机全压强                                                    |
| $P_v$               | 真空泵的极限真空度                                                |

|                    |                           |
|--------------------|---------------------------|
| $P_0$              | 无因次功率                     |
| $P_1$              | 吸送各管段起始压强                 |
| $P_2$              | 压送各管段起始压强                 |
| $\Delta P$         | 压降, 阻损                    |
| $\Delta P$         | 床层压强                      |
| $\Delta P$         | 分布板压强                     |
| $\Delta P$         | 分布板临界压强                   |
| $\Delta P$         | 颗粒质量和悬浮所引起的压降             |
| $\Delta P$         | 等速管压降                     |
| $\Delta P$         | 水平弯管压降                    |
| $\Delta P$         | 颗粒冲击摩擦管壁的压降               |
| $\Delta P$         | 颗粒间碰撞压降                   |
| $Q$                | 流量, 或二冷喷淋水流量              |
| $Q$                | 风机风量                      |
| $Q_v$              | 真空元件放气量                   |
| $Q$                | 工艺过程蒸发气体量                 |
| $Q_i$              | 微隙漏气                      |
| $Q$                | 真空内壁及构件表面解吸气体量            |
| $Q$                | 真空室耐火材料放气量                |
| $Q$                | 气体回漏量                     |
| $q$                | 气体通过气泡的穿流量                |
| $q_v$              | 单位体积的耐火材料放气量              |
| $q_m$              | 结晶器内各段热流密度                |
| $q_m$              | 结晶器平均热流密度                 |
| $q^{(1)}, q^{(2)}$ | 铸坯表面热流密度                  |
| $q_{Rj}$           | 第 $j$ 段二冷的平均热流密度          |
| $R$                | 流阻                        |
| $R_v$              | 弯管曲率半径                    |
| $R_b$              | 气泡半径                      |
| $R$                | 气泡晕半径                     |
| $Re$               | 雷诺准数                      |
| $Re_m$             | 临界雷诺准数                    |
| $Re_n$             | 修正的雷诺准数                   |
| $Re_t$             | 终端速度雷诺准数                  |
| $r$                | 管道半径, 压强比, 或二冷分段数         |
| $S$                | 分布板小孔中心间距, 凝固壳层厚度, 抽速, 或嫡 |
| $Se$               | 施密特准数                     |
| $S_v$              | 真空系统有效抽速                  |
| $Sh$               | 修伍德准数                     |



|               |                     |
|---------------|---------------------|
| $S_p$         | 真空泵额定抽速, 或无因次几何尺寸   |
| $t$           | 抽气时间                |
| $t_r$         | 铸件全凝固时间             |
| $T_o$         | 环境温度, 或初始温度         |
| $T$           | 温度                  |
| $T_E$         | 共晶温度                |
| $T_{fj}$      | 溶剂金属的熔点             |
| $T_g$         | 气体温度                |
| $T_{in}$      | 入口温度                |
| $T_M$         | 纯金属熔点               |
| $T_{out}$     | 出口温度                |
| $T_s$         | 颗粒温度, 固相温度          |
| $T_{st}$      | 钢液温度                |
| $T_{wR}$      | 冷喷淋水温度              |
| $T_\infty$    | 半无限凝固问题的积分常数        |
| $u, u_1, u_2$ | 流体速度, 气流速度          |
| $U_o, U_s$    | 底部和顶部气体的线速度         |
| $U_b$         | 气泡群上升速度             |
| $U_{br}$      | 气泡上升速度              |
| $U_{ch}$      | 垂直系统临界输送速度 (实效终端速度) |
| $U_{cs}$      | 水平系统临界输送速度 (沉积速度)   |
| $U_m$         | 物料最大速度              |
| $U_{mf}$      | 临界流态化速度             |
| $U_f$         | 实际输送的气流速度           |
| $U_i$         | 固体颗粒的自由沉降速度         |
| $U_1, U_4$    | 弯管的物料最大速度           |
| $U_2, U_3$    | 弯管的物料速度             |
| $V$           | 体积                  |
| $V_a$         | 空气比容                |
| $V_o$         | 底吹气体线速度             |
| $V_s$         | 顶吹气体线速度             |
| $V_{s1}$      | 固相体积                |
| $V_{l1}$      | 液相体积                |
| $\bar{v}$     | 气体分子平均速度            |
| $v_g^*$       | 工作蒸汽比容              |
| $v$           | 熔炼速度                |
| $W$           | 膨胀功, 搅拌功, 或底吹氧枪间的距离 |
| $\bar{w}$     | 钢液循环流量              |
| $w_i$         | 流体 实际 流速            |

|                 |                               |
|-----------------|-------------------------------|
| $w_i$           | 第 $i$ 段二冷的喷水密度                |
| $w_0$           | 标准状态下的风速                      |
| $\overline{x}$  | 质量含气率                         |
| $\gamma$        | 压缩比                           |
| $\alpha$        | 分布板开孔率, 倾斜管与水平面夹角, 马赫角, 或回归系数 |
| $\alpha'_0$     | 经验常数                          |
| $\alpha_m$      | 模子材料的热扩散系数                    |
| $\alpha_o$      | 对流传热系数                        |
| $\beta$         | 常系数, 或回归系数                    |
| $\rho$          | 密度                            |
| $\rho_b$        | 堆积密度                          |
| $\rho_f$        | 气体密度                          |
| $\rho_L$        | 液相密度                          |
| $\rho_s$        | 颗粒表观密度, 或固体密度                 |
| $\phi$          | 喷射截面比, 功率函数, 或物料与气流速度比        |
| $\phi_m$        | 最大物料与气流速度比                    |
| $\varphi$       | 吸入截面比                         |
| $\varphi^\circ$ | 马赫数转角                         |
| $\psi$          | 阻力系数修正值                       |
| $\theta$        | 转折角                           |
| $\lambda$       | 无因次速度比, 或管道内流动的阻力系数           |
| $\lambda_f$     | 纯空气阻力系数                       |
| $\lambda_h$     | 物料质量及悬浮造成的阻力系数                |
| $\lambda_{hv}$  | 垂直管阻力系数                       |
| $\lambda_{hz}$  | 水平管阻力系数                       |
| $\lambda_{hs}$  | 倾斜管阻力系数                       |
| $\lambda_s$     | 颗粒运动的摩擦阻力系数, 或颗粒冲击管壁的摩擦阻力系数   |
| $\lambda_{so}$  | 颗粒加速的阻力系数                     |
| $\eta$          | 气体粘度, 或风机和提升泵的效率              |
| $\eta$          | 喷射器效率                         |
| $\mu$           | 引射系数                          |
| $\mu_s$         | 固气输送比                         |
| $\sigma$        | 容积输送比, 表面张力, 或斯蒂芬-波尔兹曼常数      |
| $\zeta$         | 弯管空气阻力系数                      |
| $e_0$           | 孔隙度                           |
| $\varepsilon$   | 铸坯表面黑度, 噎塞时的临界孔隙率             |
| $\varepsilon$   | 比搅拌功率                         |
| $\tau$          | 时间或混匀时间                       |
| $\nu$           | 空气动力粘度                        |

# 目 录

|                     |     |
|---------------------|-----|
| 符号表                 | Ⅱ   |
| 绪言                  | 1   |
| 第1章 单元设计方法          | 2   |
| 1.1 基本方法            | 2   |
| 1.2 传热学问题举例         | 2   |
| 1.3 传质学问题举例         | 7   |
| 1.4 设计的思考路线(方法)讨论   | 9   |
| 1.5 设计过程的数学描述       | 10  |
| 第2章 工业加热            | 12  |
| 2.1 一般考虑            | 12  |
| 2.2 常用矿物与气体燃料       | 14  |
| 2.3 燃烧计算            | 16  |
| 2.4 燃烧与气化装置         | 24  |
| 2.5 电加热             | 26  |
| 第3章 流态化             | 28  |
| 3.1 流态化现象           | 28  |
| 3.2 固定床的压强          | 29  |
| 3.3 临界流态化参数         | 31  |
| 3.4 颗粒的终端速度         | 33  |
| 3.5 颗粒终端速度与临界流化速度关系 | 35  |
| 3.6 聚式流态化床中的气泡现象    | 36  |
| 3.7 流化床中的传热         | 38  |
| 3.8 流化床中的传质         | 41  |
| 3.9 流态化装置的设计        | 44  |
| 第4章 气力输送            | 54  |
| 4.1 气力输送状态相图        | 54  |
| 4.2 气力输送分类          | 56  |
| 4.3 稀相气力输送          | 58  |
| 4.4 浓相动压气力输送        | 68  |
| 4.5 浓相静压气力输送        | 70  |
| 4.6 气力输送系统主要部件      | 72  |
| 4.7 气力输送系统设计        | 85  |
| 第5章 气体输送            | 96  |
| 5.1 通风机和鼓风机         | 96  |
| 5.2 高速喷管            | 102 |

|                                                                 |     |
|-----------------------------------------------------------------|-----|
| 5.3 喷射器 .....                                                   | 124 |
| <b>第6章 真空系统</b> .....                                           | 133 |
| 6.1 真空系统 .....                                                  | 133 |
| 6.2 真空系统气体的运动状态 .....                                           | 134 |
| 6.3 沿管道流动的气体流量方程 .....                                          | 136 |
| 6.4 气体通过小孔的流量 .....                                             | 137 |
| 6.5 管道的流导 .....                                                 | 138 |
| 6.6 真空获得装置 .....                                                | 142 |
| 6.7 真空系统抽气时间的计算 .....                                           | 157 |
| 6.8 真空系统设计 .....                                                | 159 |
| <b>第7章 冷却系统</b> .....                                           | 166 |
| 7.1 冷却过程的发展和原理综述 .....                                          | 166 |
| 7.2 常规热流 ( $q < 0.6 \times 10^6 \text{ W/m}^2$ ) 冷却器设计 .....    | 167 |
| 7.3 超高热流 ( $q \geq 1.2 \times 10^6 \text{ W/m}^2$ ) 冷却器设计 ..... | 168 |
| 7.4 冷却器的热流 .....                                                | 169 |
| 7.5 冷却器结构 .....                                                 | 170 |
| 7.6 进出水温差的含意 .....                                              | 171 |
| 7.7 软水密闭循环系统——节水长寿的冷却技术 .....                                   | 172 |
| <b>第8章 搅拌和气力提升</b> .....                                        | 174 |
| 8.1 机械搅拌 .....                                                  | 174 |
| 8.2 气力提升泵 .....                                                 | 178 |
| 8.3 比搅拌功率 .....                                                 | 182 |
| 8.4 混匀时间和谐时性准数 .....                                            | 186 |
| <b>第9章 凝固和连铸</b> .....                                          | 193 |
| 9.1 凝固现象的基本认识 .....                                             | 193 |
| 9.2 凝固参数 .....                                                  | 196 |
| 9.3 纯金属的一维凝固 .....                                              | 199 |
| 9.4 实际金属的凝固 .....                                               | 208 |
| 9.5 连铸坯凝固传热的数学模型 .....                                          | 212 |
| 9.6 连铸工艺的CAO/CAD .....                                          | 219 |
| 主要参考文献 .....                                                    | 227 |
| 附录一至十四 .....                                                    | 228 |

## 绪 言

冶金工程是复杂的高温生产过程，它包括炼铁、炼钢、连铸、压力加工以及原料和成品加工等。虽然它们都有不同的工艺过程，但是根据其过程的物理变化和化学变化的本质，概括和抽象出某些共同的原理，划分为单元设计和反应工程，成为冶金工程的两大支柱。

以冶金工业中的物理过程为研究对象，依据其物理变化的物理操作，将冶金工业划分为若干单元设计或单元操作。单元设计是应用动量、热量和质量传递原理来研究冶金过程中的物理操作及其装置的合理设计的工程理论和方法的学科。它是以传递原理和现代计算技术为基础的新学科。为冶金工程提供设计原理、计算方法、最佳设计和工艺参数选择，以便指导和控制冶金生产过程。

冶金单元设计的内容是非常广泛的，可以概括为动量、热量和质量传递在冶金工业中的应用。其基本内容包括流体流动、气固两相流、气液两相流、可压缩流体流动、分子流动、导热、对流和辐射传热以及沸腾传热等。本书主要介绍工业加热、流态化、气力输送、风机和喷射器、真空系统、冷却系统、搅拌、凝固和连铸等。

实际上，将一种冶金生产流程付诸实施，总是根据生产流程需要选择若干单元设计和组合，即应用传输原理进行过程设计，参数选择及其装置设计，并将各单元设计组合成生产流程。例如超高功率电弧炉的氧—燃料燃烧器助熔技术，利用燃料的燃烧热去加热炉内冷区炉料，加速熔化过程，达到节能、降耗、增产的目的。该技术由流态化、气力输送、燃烧器、冷却等单元构成，设计其单元装置，构成氧、燃料燃烧的助熔系统。并设计其工艺操作参数，包括燃烧所需工艺参数和电炉冶炼工艺参数的调整等。

冶金单元设计仍然是遵循“实验室—中间试验—工业生产”的技术开发研究的步骤，首先在试验室通过相似模拟探索方向，然后通过中间试验确定其技术经济的合理性，取得设计参数，最后，应用相似原理，包括几何尺寸、流动、混合、传热、传质等过程相似，进行工程放大。

冶金单元设计的研究方法，基于单元设计的主要任务是设计、放大或控制，必须就研究对象用数学语言定量描述，建立数学模型，运用动量、传热和传质的传递过程的基本方程。为此，经常对整个体系或其中一部分进行动量、能量和质量的平衡计算，可以得到参数间的关系式，有较大的实用价值。运用计算机进行数学模拟，以便确定其边界条件和数学模型中的系数，得到单元设计的基本参数。同时，应用模型和实验数据相匹配的方法，进行参数估计和最优化设计。

# 第 1 章 单元设计方法

## 1.1 基本方法

冶金单元设计的基本方法应该是衡算,即一系列的由不同角度和要求出发的平衡计算。工程上最常用的设计衡算大体上有以下三个主要方面:

(1) 物料平衡与热平衡。它一般用于解决燃料消耗、供热能力等问题。

(2) 传热、传质速率平衡。它一般用于解决设备的大小和生产能力等问题。

(3) 机械功的平衡。它一般用于解决泵送功率、马达配置等问题。这一切将在以下用实例来说明。

除了这类系列性的衡算所考虑的内容外,在实践中自觉锻炼掌握并运用工程知识和经验数据也是必要的。就理论逻辑讲,需要“再学习”,而不是简单的重复,温故而知新、熟能生巧。就方法讲,将引导初学者练习收集和选用资料,运用所学来解决工程问题,也是作者写此书的目的。

## 1.2 传热学问题举例

例 1-1: 设计一座小型试验用高炉的蓄热式石球热风炉(Pebble stove), 要求送风能力 $12\text{m}^3/\text{min}$ , 风温 $1000^\circ\text{C}$ 。用 $\phi 35\text{mm}$ 的球形堆积体换热, 燃烧柴油。初步设想球层直径为 $600\text{mm}$ 。

数据取得与确定求解内容:

求解参数:

1) 加热期的柴油用量 $G$ ,  $\text{kg/h}$ ;

2) 所需球层体积 $V$ ,  $\text{m}^3$ ;

3) 送风期球层阻力 $\Delta P$ ,  $P_c$ 和气体通过球层的功率 $N$ ,  $\text{kW}$ 。

球的几何参数: 调查生产厂提出数据, 高铝质 $\phi 35\text{mm}$ 石球, 密度 $2.6\text{g}/\text{cm}^3$ , 堆积密度 $1.67\text{t}/\text{m}^3$ 。计算球层的孔隙度 $\varepsilon = 1 - \frac{1.67}{2.6} = 0.358$ , 计算球层的受热面(比表面积)

$$S = \frac{6(1-\varepsilon)}{d} = \frac{6(1-0.358)}{0.035} = 114\text{m}^2/\text{m}^3\text{球层}。$$

结构形式: 两座热风炉轮换加热与送风, 炉顶装有柴油燃烧器, 燃烧器和燃烧空间下面则是自由堆积的球层。

解: 1) 用热平衡衡算求柴油用量 $G$ :

$$\text{由热风输出的热量} \quad 12 \times 60 \times 1465.5\text{kJ} \quad (1-1)$$

$$\text{由柴油燃烧获得热量} \quad G \times 41870 \times 0.55\text{kJ} \quad (1-2)$$

显然这两者相等  $\therefore G = 45.7\text{kg/h}$

式中 $1465.5\text{kJ}/\text{m}^3$ 是风加热到高温的热焓;  $41870\text{kJ}/\text{kg}$ 是油的低发热值;  $0.55$ 是总热效率。

2) 用传热速率方程求球层体积 $V$ :

按理应该用球层面积, 但对于堆积床 (Packed bed), 用体积更方便实用, 于是传热速率方程写成

$$Q = \alpha_v \cdot V \cdot \Delta T \quad (1-3)$$

中心问题是寻求到按体积计算的对流传热系数 $\alpha_v$ 。读者回顾过去所学, 强制对流传热的两种常见过程的计算式, 一是管内流, 另一是管外的绕流(埋置于流体中的物体)。显然其过程和堆积层不同, 要求自己去寻求。设计师的一种能力就是要平时积累资料和按要求查找资料。前苏联学者 Китаев 的数据:

在球层中

$$\alpha_v = \frac{12 u_0 T^{0.3}}{d^{1.35}} \quad (1-4)$$

这里球层平均温度取 $T = 1000\text{K}$ , 标况下风速

$$w_0 = \frac{12/60}{\frac{\pi}{4} \times 0.6^2} = 0.707 \text{ m/s}$$

代入式 (1-4)  $\therefore \alpha_v = \frac{12 \times 0.707 \times 1000^{0.3}}{0.035^{1.35}} = 7210.9 \text{ J/m}^3 \cdot \text{s} \cdot \text{K}$

考虑球自身传导传热的热阻, 将 $\alpha$ 按0.8计算写成

总传热系数  $\alpha_z = 0.8 \times 7210.9 = 5769 \text{ J/m}^3 \cdot \text{s} \cdot \text{K}$

按经验考虑燃烧产物与风温的平均温差 $\Delta T = 150\text{K}$ , 代入 (1-3) 式求得所需的球层体积

$$V = \frac{12 \times 1465.5 \times 1000 \times 1.3}{5769 \times 150 \times 60} = 0.44 \text{ m}^3$$

式中1.3为安全系数。相应的球层高度

$$H = \frac{0.44}{\frac{\pi}{4} \times 0.6^2} = 1.56 \text{ m}$$

3) 用机械功平衡计算送风期穿过球层的鼓风功率 $N$ : 首先要求得到风通过床层的阻力损失。方法显然多样, 有的办法也很复杂, 但目前则是个特殊的散料层——球层, 可利用图1-1最为简单, 这是郭慕荪等人的算图。实际上利用这个图也可计算球体的落下端速度 (terminal velocity)。它是由球层所处的 $Re$ 数和孔隙度 $\epsilon$ 求出压降 Archimedes 数 $Ar_{\Delta P}$ , 从而算出流体通过床层的压降 $\Delta P$ 。这里

实际流速  $u_t = 0.707 \left( \frac{273 + t}{273} \right) = 0.707 \left( \frac{1000}{273} \right) = 2.59 \text{ m/s}$

空气动力粘度  $\nu_{1000\text{K}} = 125 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$   
 $d = 0.035 \text{ m}$

粒径  $\therefore Re = \frac{2.59 \times 0.035}{125 \times 10^{-6}} = 725$

孔隙度已知

$$\varepsilon_0 = 1 - \frac{1.67}{2.6} = 0.358$$

按已知  $Re$ 、 $\varepsilon_0$  查图 1-1, 得到  $Ar_{\Delta P} = 2.2 \times 10^7$ 。按郭慕荪定义  $Ar_{\Delta P} = \frac{D^3 P_l}{\eta^2} \times \frac{\Delta P}{L(1-\varepsilon_0)}$

于是

$$2.2 = \frac{0.035^3 \times 0.36 \times 1.3}{(4.12 \times 10^{-5})^2 (1-0.358)} \times \frac{\Delta P}{L}$$

$$\therefore \frac{\Delta P}{L} = 1194.8 \text{ Pa/m}$$

$$\therefore \text{阻损 } \Delta P = 1194.8 \times 1.56 = 1864 \text{ Pa}$$

式中 0.36 是 1000K 空气密度, 1.3 是炉内绝对大气压力,  $4.2 \times 10^{-6}$  为 1000K 空气粘度。

在阻力不是很大时, 与克服阻力相应的功率可简单地使用流量和阻力的乘积。

$$\begin{aligned} \therefore \text{轴功率 } N &= \frac{12 \text{ m}^3/\text{min} \times 1864 \text{ N/m}^2}{60 \text{ s/min} \times 1000 \text{ N} \cdot \text{m/s/kW}} \\ &= 0.373 \text{ kW} \end{aligned}$$

以上只是示意地用三个衡算计算出这个蓄热室的数据。这比采用经验数据 (例如  $1 \text{ m}^3$  高炉炉容要求多少格砖受热面)。要科学得多。当然, 从方法上讲作者仍不忽视经验数值的重要性。值得注意的是, 当作开发性的设计时, 只照猫画虎, 而不善于作单元设计方面的工程衡算, 常常会出现问题。另外, 对某个具体问题能事先对工程数据作出估计总比一无所知要好得多。

对上述示例还可作进一步分析, 它仅仅表达了一个正确的程序化的思考路线, 还有缺点 (例如工程化不足等), 实践起来会出现问题。该示例中由传热速率考虑了所需热交换器的受热面积, 这是对的, 也是最基本的工程考虑。计算的结果是只需要  $0.44 \text{ m}^2$  的受热面, 每分钟就可供给  $12 \text{ m}^3$ 、 $1000^\circ\text{C}$  的热风, 而且设计中还留了过大的潜力。如前述, 可以作不同角度的衡算, 如再作一换热周期内砖的蓄热能力与供热要求的热平衡, 就会发现问题。即在实用的周期内, 例如  $20 \sim 40 \text{ min}$ , 会出现过大的风温降落, 亦即周期内球层的蓄热能力不足, 从而达不到所要求的风温。

例如送风周期选用  $30 \text{ min}$ , 计算送风期的热平衡, 即

蓄热球层周期内拥有热量 = 周期内空气带走热量

于是风温降落

$$\Delta T_{30 \text{ min}} = \frac{12 \times 30 \times 1465.5}{0.44 \times 1.67 \times 1000 \times 0.921} = 780^\circ\text{C}$$

式中 0.921 为蓄热球的热容, 显然, 这么大的风温降, 即使能供出热量, 也供不出  $1000^\circ\text{C}$  的风温!

而把送风周期减为  $5 \text{ min}$ , 则风温降只有  $\frac{5}{30}$ , 即  $130^\circ\text{C}$ , 作业时将不会出问题。但如此短的送风期, 在工程上却很难行得通。要实用化就只能增加蓄热球的数量, 即按周期热



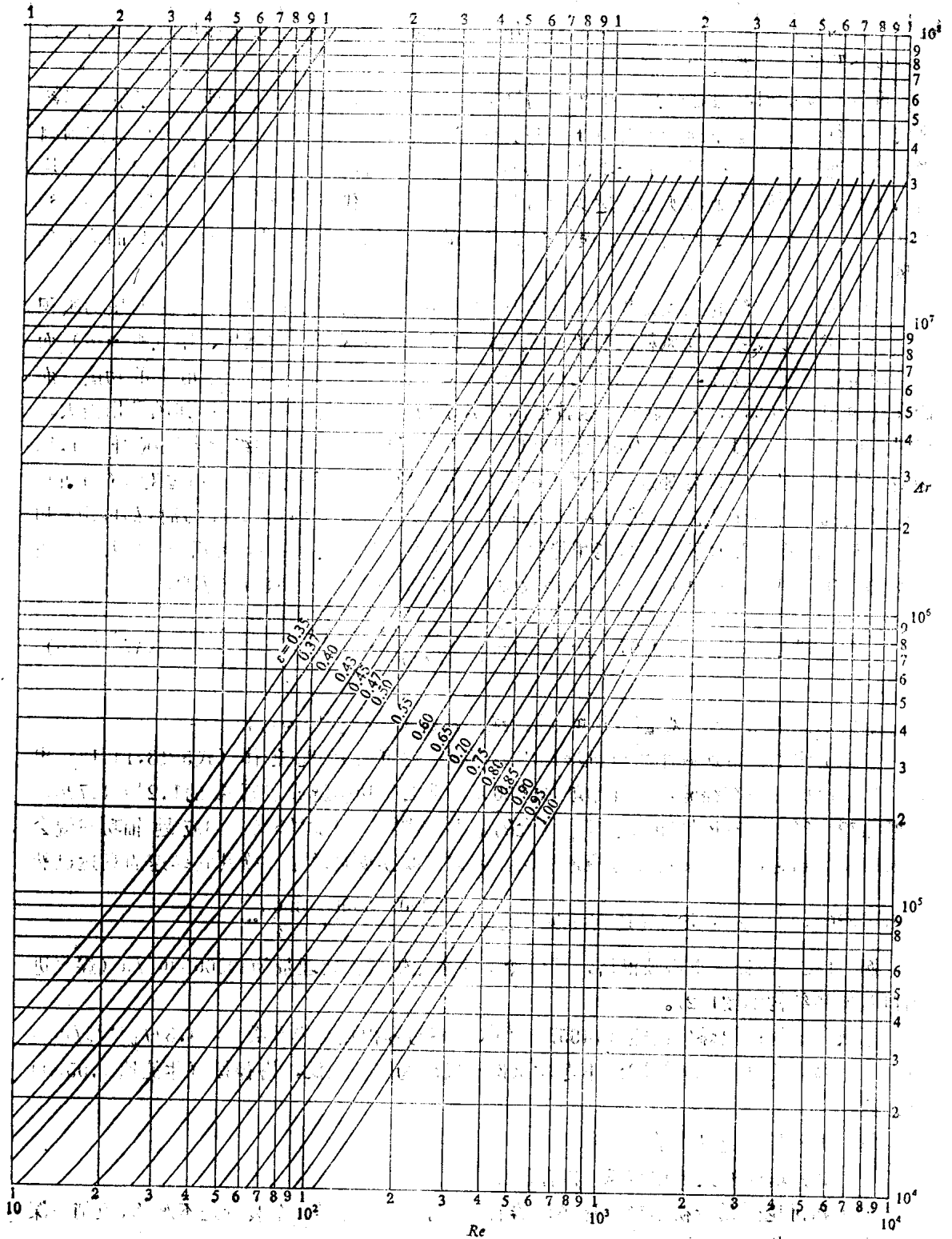


图 1-1 球层中  $Ar$  与  $Re$  的计算关系