

空分设备设计讲座

第二讲 换热器的设计计算(下)

(石头蓄冷器)

西安交通大学制冷教研室设计讲座编写组

一、概 述

蓄冷器是空分装置中的一个主要设备，它既有热交换功能，同时还具有净化功能，因此广泛地应用于大型低压空分装置上。蓄冷器是一种蓄热式换热器，成对使用，图 1 示出了一对蓄冷器的系统图。

蓄冷器内充填卵石作为填料，习惯上称为石头蓄冷器。图 2 所示是 3200 米³/时 空分装置中的石头蓄冷器。筒体是一个直立圆柱容器，内部充满卵石，多层绕在中心筒上的蛇管均匀嵌在卵石中，蛇管的纵向和横向间距保证使蛇管周围充满卵石。空气自上到下，污氮自下至上地通过蓄冷器，蛇管中通过纯的氧气和氮气，在距底部 1/4 高处有抽气口，抽出部分空气保证蓄冷器不被 CO₂、H₂O 堵塞。为了防止卵石随气流带出，上、下端及抽气口均装有网罩。

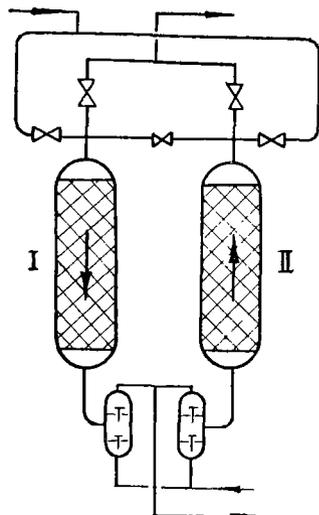


图 1 蓄冷器系统图

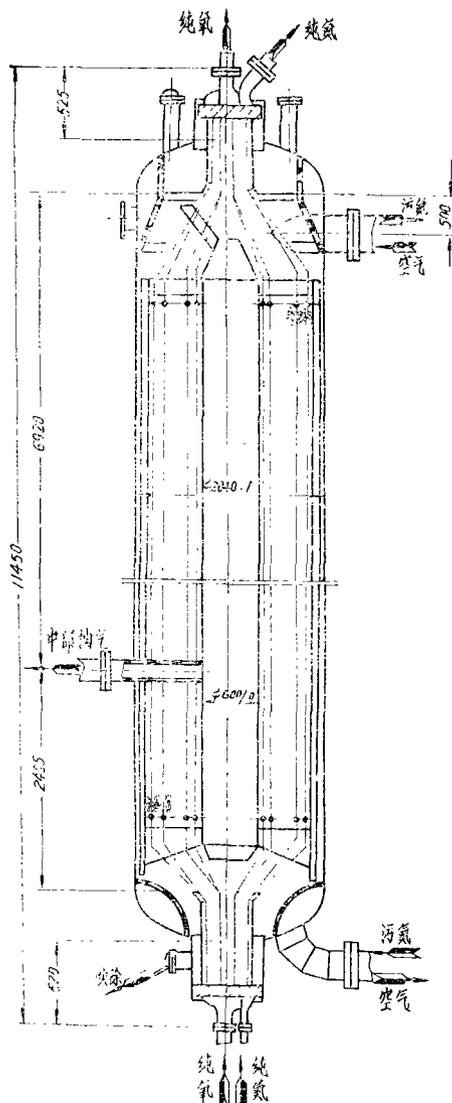


图 2 3200 米³/时制氧机蓄冷器

蓄冷器上部-45℃以上筒体、封头的材料采用16锰钢，-45℃以下筒体、封头的材料采用1Cr18Ni9Ti 不锈钢。 $\phi 19 \times 1.5$ 蛇管的材料是紫铜管。卵石尺寸是9~12毫米。

(一) 蓄冷器的传热方程

蓄冷器内周期地交替通过正流空气和返流冷气体，它与一般热交换器不同之点是蓄冷器每一截面上气体和填料温度是随时间而变的。热周期中，填料接受热量后温度逐渐升高，同时促使空气的温度也逐渐上升，直至热周期结束，冷周期中返流气体和填料的温度不断降低，因此蓄冷器中的热交换是一个不稳定的传热过程。

另外，蓄冷器中的填料在冷周期中的平均温度低于热周期中的平均温度，这两个平均温度差就是蓄冷器的温度滞后回线高度 h 。由于温度滞后回线的存在，减小了冷、热气体之间的温差，使热交换变坏。

蓄冷器的实际设计仍是仿照间壁式热交换器进行计算的。我们分析某一截面上气体和填料表面的传热(图3)，取整个周期的平均温度，空气对填料表面依靠温差 $(t_1 - t_{H1})$ 来传递热量，填料对氮气依靠温差 $(t_{H2} - t_2)$ 来传递热量，只要把由于温度滞后回线所形成的 $\Delta t_H = (t_{H1} - t_{H2})$ 看成是间壁式热交换器中壁面内的温降，那么把一对蓄冷器里分别进行的热周期和冷周期这两个过程合并起来，就相当于一个间壁式热交换器。

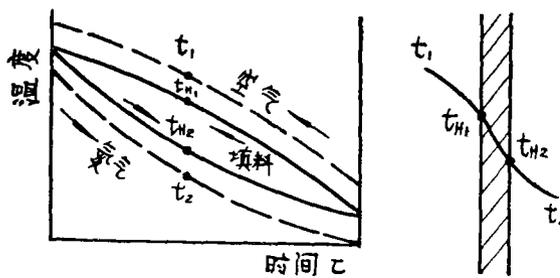


图3

设填料表面积 F ，周期 Z ，则工作于热周期内的蓄冷器填料吸热：

$$Q' = \alpha_1 \cdot F \cdot Z \cdot (t_1 - t_{H1})$$

工作于冷周期内的填料放热：

$$Q' = \alpha_2 \cdot F \cdot Z \cdot (t_{H2} - t_2)$$

得 $(t_1 - t_{H1}) + (t_{H2} - t_2) = \frac{Q'}{Z \cdot F} \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right)$

令 $Q = \frac{Q'}{Z}$ —— 单位时间换热量

则 $Q = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2}} \cdot F \cdot [(t_1 - t_2) - (t_{H1} - t_{H2})]$

与间壁式热交换器一样， $(t_1 - t_2)$ 代之对数平均温差 Δt_M ，而 $(t_{H1} - t_{H2})$ 代之滞后回线高度的平均值 h_{CP} ，于是：

$$Q = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2}} \cdot F \cdot (\Delta t_M - h_{CP}) = K \cdot F \cdot (\Delta t_M - h_{CP})$$

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2}}$$

利用上述公式可设计蓄冷器。

应用此传热方程式时，也可作一些变换，将 h_{CP} 的影响考虑到传热系数 K 中去，认为

正、返气体之间温差为 Δt_M 。由于滞后回线高度引起了热交换的恶化，造成传热量的减少，归入使传热系数降低。如果不考虑滞后回线高度时，传热系数为 K_0 ，具有滞后回线高度时，传热系数为 K ，则 K 按下式求得：

$$K = \left(\frac{K}{K_0} \right) \cdot K_0$$

应当指出，由于空气中水份和二氧化碳在填料上的凝结，冷凝物的影响将降低蓄冷器的性能，导致所需传热面积的增加。精确的设计则应考虑此影响，目前蓄冷器设计中一般不考虑。

(二) 蓄冷器的自清除

蓄冷器高度上温度变化范围是 30°C 至 -173°C 左右。空气通过蓄冷器时所含的 H_2O 、 CO_2 沿高度逐渐析出，沉积于填料上。当返流冷气体通过填料时，沉积的 H_2O 、 CO_2 进入冷气体带出蓄冷器。如果冷气体所具有的带出 H_2O 、 CO_2 的能力大于空气沉淀出的数量，则蓄冷器能正常工作。因此设计中应保证蓄冷器内没有沉积物，蓄冷器具有自清除能力，或称不冻结性。

进入蓄冷器的空气其水份含量常常是饱和的。水饱和蒸汽压的大小与温度有关，表 1 列出了不同温度下水饱和蒸汽压。图 4 示出不同压力、温度下饱和水份含量。

空气中 CO_2 含量较少，约为 $0.03\sim 0.04\%$ 表 2 列出了不同温度下 CO_2 饱和蒸汽压。

1. 蓄冷器不被水份冻结的条件：

蓄冷器工作时，不被水份冻结的条件是：在蓄冷器任一截面上，空气在冷却时沉积在填料上的水份能够全部被返流气体带出，则称能对水份自清除。

蓄冷器内某截面上空气通过时带入的水份量为：

$$G_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{热}} = \gamma_{\text{H}_2\text{O}} \cdot V_{\text{热}} \cdot \frac{P_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{热}}}{P_{\text{热}}}$$

返流气体通过时带出的水份量为：

$$G_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{冷}} = \gamma_{\text{H}_2\text{O}} \cdot V_{\text{冷}} \cdot \frac{P_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{冷}}}{P_{\text{冷}}}$$

二式中： $P_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{热}}$ 、 $P_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{冷}}$ ——空气与冷气体中水蒸汽饱和蒸汽压

$P_{\text{热}}$ 、 $P_{\text{冷}}$ ——空气与冷气体压力

$V_{\text{热}}$ 、 $V_{\text{冷}}$ ——空气与冷气体体积（标准状态）

$\gamma_{\text{H}_2\text{O}}$ ——标准状态下水蒸汽的重度

如果蓄冷器不被冻结，必须 $G_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{冷}} \geq G_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{热}}$ ，即

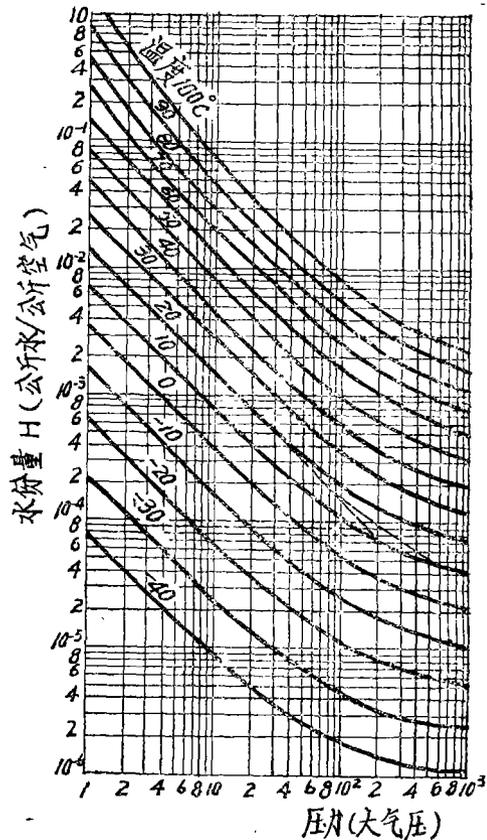
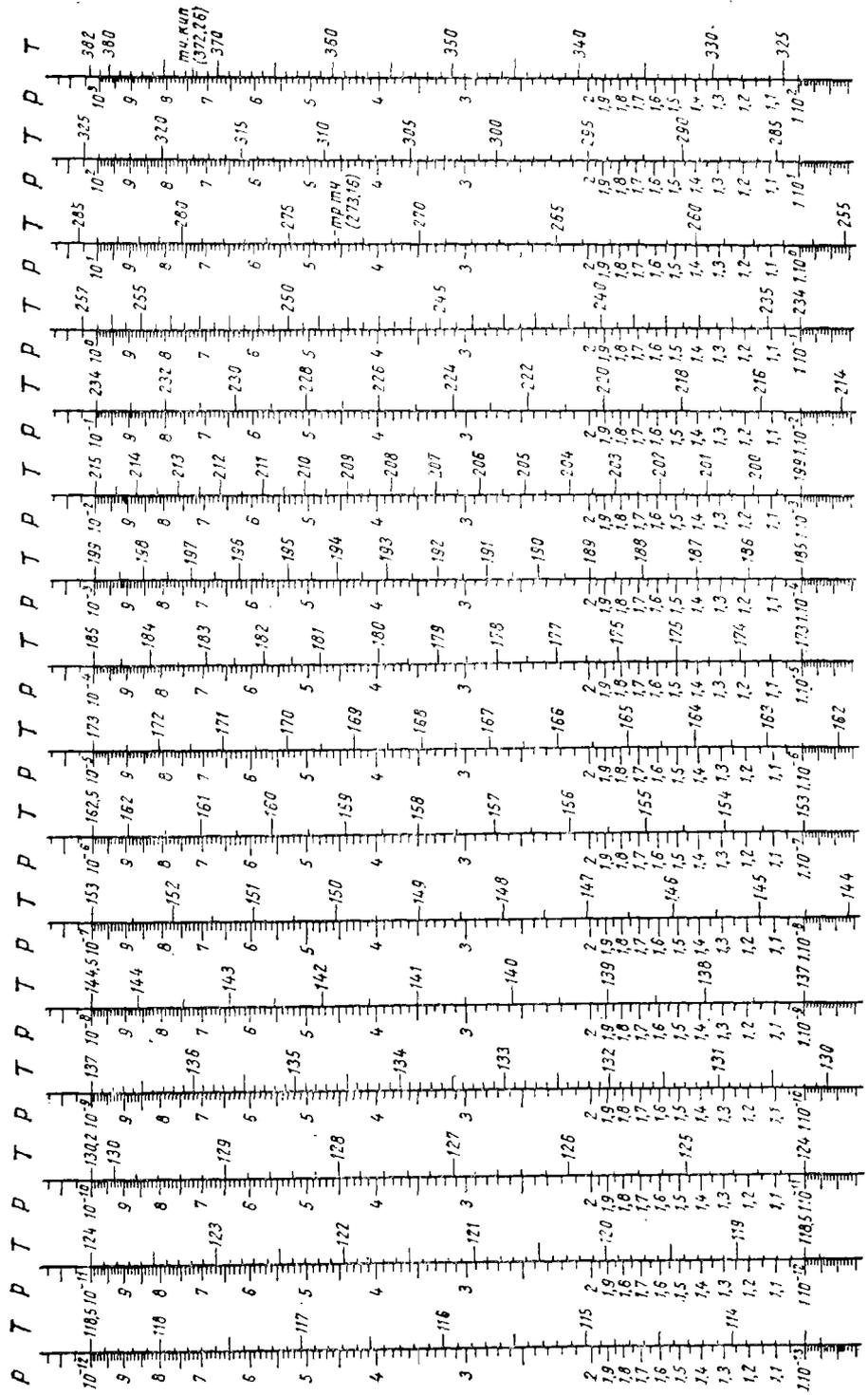


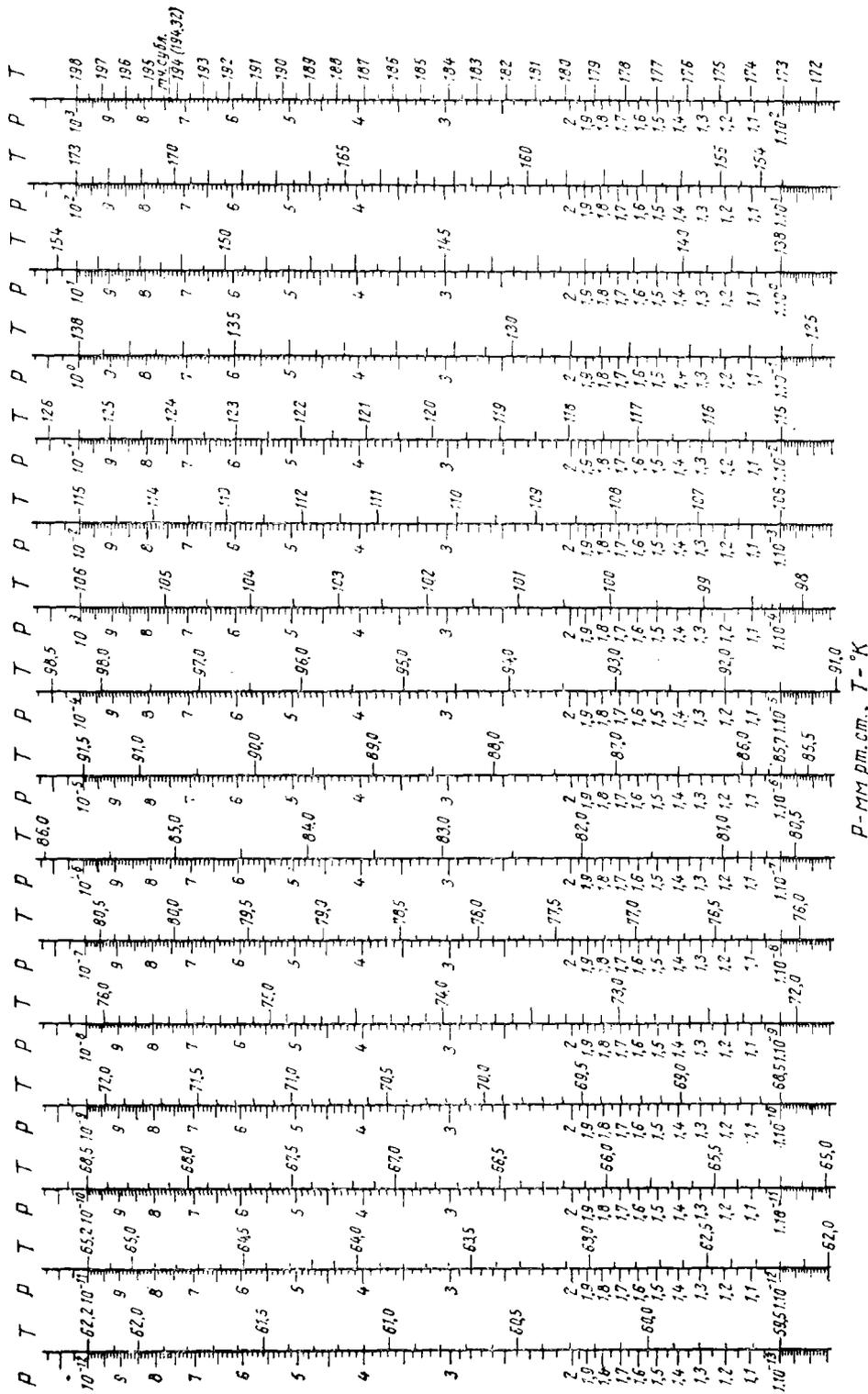
图 4 空气的饱和水份曲线



P-MM pm.c.m., T-°K

表 I 不同温度下水饱和和蒸汽压

[引自《用深冷法分离空气》(俄)第 I 卷。表 2 附]



P-MM pm.cm., T-°K

表2 不同温度下二氧化碳饱和和蒸汽压

$$\frac{\gamma_{H_2O} \cdot V_{冷} \cdot P_{H_2O}^{冷}}{P_{冷}} \geq \frac{\gamma_{H_2O} \cdot V_{热} \cdot P_{H_2O}^{热}}{P_{热}}$$

$$P_{H_2O}^{冷} \geq \frac{V_{热} \cdot P_{冷}}{V_{冷} \cdot P_{热}} \cdot P_{H_2O}^{热}$$

$$\frac{V_{热} \cdot P_{冷}}{V_{冷} \cdot P_{热}} \text{ 取决于流程, 是一个定值, 令 } \frac{V_{热} \cdot P_{冷}}{V_{冷} \cdot P_{热}} = \frac{1}{n}。$$

$$\text{得 } P_{H_2O}^{冷} \geq \frac{1}{n} \cdot P_{H_2O}^{热}$$

从公式可知, 空气流经该截面时, 水蒸汽分压为 $P_{H_2O}^{热}$, 从水份自清除的要求, 返流气体通过该截面时它的水蒸汽分压必须大于 $\frac{1}{n} \cdot P_{H_2O}^{热}$ 。气体中水饱和蒸汽压取决于气体的温度, 也就是说, 当空气在该截面上为某一温度时, 冷气体的温度必须大于某一下限值。空气的温度与冷气体的下限温度值之差称某截面上的空气和冷气体之间的最大允许温差 ($\Delta t_{最大}$), 由于水饱和蒸汽压在不同温度时其数值不同, 因此空气在不同温度时, 空气与冷气体之间的最大允许温差也不同。

如果返流气体中水蒸汽不处于饱和状态, 具有一个相对湿度 φ , 则:

$$G_{H_2O}^{冷} = \gamma_{H_2O} \cdot V_{冷} \cdot \frac{P_{H_2O}^{冷} \cdot \varphi}{P_{冷}}$$

自清除条件为:

$$P_{H_2O}^{冷} \geq \frac{1}{\varphi} \cdot \frac{1}{n} \cdot P_{H_2O}^{热}$$

φ 常采用 0.8~0.9。

2. 蓄冷器不被 CO_2 冻结的条件:

蓄冷器不被 CO_2 冻结的条件是: 在蓄冷器任一截面上, 空气在冷却时沉积在填料上的 CO_2 能够全部被返流气体所带出, 称能对 CO_2 自清除。

按与水份同样的分析方法, 蓄冷器不被 CO_2 冻结的条件是:

$$P_{CO_2}^{冷} \geq \frac{1}{\varphi \cdot n} P_{CO_2}^{热}$$

常采用 $\varphi=1$ 。

比较 CO_2 自清除和 H_2O 自清除的能力, 可知不被 CO_2 冻结所允许的最大温差较小。同时蓄冷器中空气与冷气体之间的实际温差在热端较小, 随温度降低逐渐增大, 如不采取措施, 至冷端为最大。因此蓄冷器中最先发生沉积的截面往往在冷端。设计中一般仅计算 CO_2 的自清除能力。

空气与返流气体之间的实际温差可由热力计算的 Q-T 图上求得。给定 $n \cdot \varphi$ 时, 可计算出不被 H_2O 、 CO_2 冻结的 $\Delta T_{最大} - T_{空气}$ 曲线, 或 $\Delta T_{最大} - T_{冷}$ 曲线, 将三条曲线绘制在一张图上, 如图 5 所示。

图 5 中, 曲线 ABC 是空气与返流气体之间实际温差随 $T_{空气}$ 变化曲线。如果没有“环流”空气进入蓄冷器, 实际温差曲线为 ABC'。DE 线为不被 H_2O 冻结的最大温差曲线。FG 线为不被 CO_2 冻结的最大温差曲线。

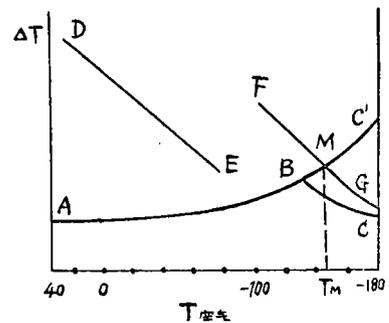


图 5

由图可知, 如无“环流”空气, ABC' 曲线与 FG 曲线相交于 M 点, 在 T_M 以下, 空气与冷气体之间的温差大于 CO_2 不冻结所允许的最大温差, 蓄冷器在该截面以后开始有 CO_2 沉积产生, 这是不允许的。增加了“环流”空气, ABC 曲线与 FG 无交点, 空气与冷气体间的温差都在不被 CO_2 冻结所允许最大温差之下, 蓄冷器内不会产生 CO_2 、 H_2O 的沉积, 蓄冷器具有自清除能力。

二、石头蓄冷器的设计计算

(一) 热平衡

装置进入稳定状态后, 蓄冷器中部温度 (填料平均温度) 是不变的, 空气和冷损加入的热量全部转移给返流气体, 蓄冷器的热平衡方程:

$$B \cdot \gamma_B \cdot (i_1 - i_3) + B \cdot q_3 = A \cdot \gamma_A \cdot (i_2 - i_4) + A_{3M} \cdot \gamma_{3M} \cdot (i_6 - i_7)$$

式中: B —— 加工空气量

A —— 污氮气量

A_{3M} —— 蛇管内纯气体量

γ_B 、 γ_A —— 空气和污氮的比重

γ_{3M} —— 蛇管内纯气体比重

i_1 、 i_3 —— 空气进口、出口的焓值

i_2 、 i_4 —— 污 N_2 出口、进口的焓值

i_6 、 i_7 —— 纯气体出口、进口的焓值

q_3 —— 蓄冷器的冷损

如果从蓄冷器中部抽出部分空气去 CO_2 吸附器, 则热平衡方程式为:

$$B \cdot \gamma_B \cdot (i_1 - i_3) + B \cdot q_3 - B_T \cdot \gamma_B \cdot (i_5 - i_3) = A \cdot \gamma_A \cdot (i_2 - i_4) + A_{3M} \cdot \gamma_{3M} \cdot (i_6 - i_7)$$

式中: B_T —— 抽出的部分空气量

i_5 —— 抽出口处空气的焓值

蓄冷器中填料的热负荷为:

$$Q_H = B \cdot \gamma_B \cdot (i_1 - i_3) - B_T \cdot \gamma_B \cdot (i_5 - i_3) - \frac{A_{3M} \cdot \gamma_{3M} \cdot (i_6 - i_7)}{2}$$

$$\text{或} \quad Q_H = A \cdot \gamma_A \cdot (i_2 - i_4) + \frac{A_{3M} \cdot \gamma_{3M} \cdot (i_6 - i_7)}{2} - B \cdot q_3$$

一对蓄冷器中蛇管的热负荷

$$Q_{3M} = A_{3M} \cdot \gamma_{3M} \cdot (i_6 - i_7)$$

每一个蓄冷器中蛇管的热负荷

$$Q_1 \approx Q_2 = \frac{Q_{3M}}{2}$$

(二) 温差

由于蛇管中不断通过纯气体, 因此蓄冷器中气体和填料的温度变化就与无蛇管的不同。热周期中蛇管内纯气体放出的冷量使填料和空气的温度升高减少, 冷周期中蛇管内纯气体放出的冷量, 使污氮和填料的温度降低减少, 所以冷、热周期中蓄冷器温度变化趋于平缓。蛇管内纯气体的影响使蓄冷器填料温度滞后回线高度的计算已不可能, 设计中采用热交换气体

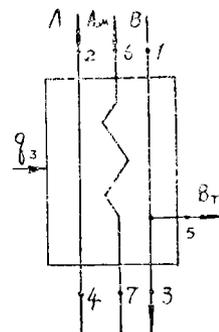


图 6

间的对数平均温差作为填料的计算温差。

首先将蛇管内纯气体和蛇管外污氮合起来作为返流气体来考虑，同空气进行热交换，求蓄冷器各截面上空气和返流气体之间的平均温差。

返流气体的数量等于蛇管内纯气体和蛇管外污氮的总和，返流气体的进口焓和出口焓是蛇管内外气体的混合焓值。

由于具有空气抽出口，因而以抽出口划分上部和下部，分别计算。冷损均匀分配在整个蓄冷器高度上（图7）。

由热平衡求取各截面上空气和返流气体的温差，以空气温度为横座标，空气和返流气体之间温差为纵坐标，得 $\Delta T-T_{\text{空气}}$ 曲线，如图8所示。

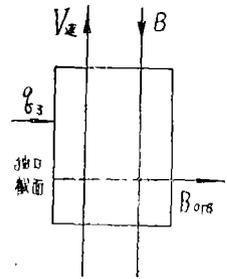


图7

中间抽气口以上的平均温差：

$$\Delta T_m^{\text{上}} = \frac{\Delta t_{\text{抽}} - \Delta t_{\text{热}}}{2.3 \lg \frac{\Delta t_{\text{抽}}}{\Delta t_{\text{热}}}}$$

中间抽气口以下的平均温差：

$$\Delta T_m^{\text{下}} = \frac{\Delta t_{\text{抽}} - \Delta t_{\text{冷}}}{2.3 \lg \frac{\Delta t_{\text{抽}}}{\Delta t_{\text{冷}}}}$$

蓄冷器中空气与返流气体之间的对数平均温差为：

$$\Delta T = \frac{\Delta T_m^{\text{上}} - \Delta T_m^{\text{下}}}{2.3 \lg \frac{\Delta T_m^{\text{下}}}{\Delta T_m^{\text{上}}}}$$

蛇管的计算温差：

蛇管内纯气体的温度变化较复杂，纯气体与管外气体之间热交换在冷、热周期中不一样，热周期中蛇管内纯气体与空气之间进行热交换，冷周期中蛇管内纯气体与污氮进行热交换，两种情况下蛇管内纯气体和管外气体之间的温差和传热系数是不等的。假定蛇管在冷、热周期中热交换热量是相等的：

$$Q_1 = Q_2 = \frac{Q_{\text{SM}}}{2}$$

从 $\Delta T-T_{\text{空气}}$ 图上作出污氮温度变化曲线和纯气体温度变化曲线，如图8所示。

根据图8上数据分别求得纯气体和空气之间平均温差，纯气体和污氮之间的平均温差。

再将冷、热周期的平均温差进行算术平均，得蛇管的计算平均温差。

空气出蓄冷器的温度常采用空气的饱和温度，或过热 $1 \sim 2^\circ\text{C}$ 。

为了保证蓄冷器的自清除，空气和污氮在冷端的温差不大于 $3 \sim 5^\circ\text{C}$ ，热端的温差不超过 $3 \sim 5^\circ\text{C}$ 。

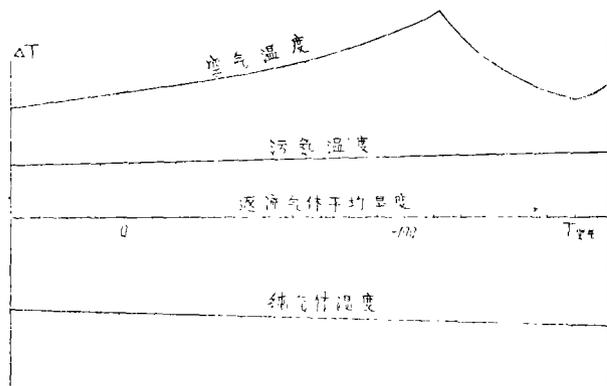


图8

蛇管内纯气体和空气的温差，在热端常采用 6 ~ 12℃，在冷端受自清除的要求约束不超过 3 ~ 8℃。

(三) 传热系数

1. 气体对填料的放热系数、传热系数:

散粒物料层中对流热交换的准则式:

$$Nu = A \cdot Re^n$$

由于在整理试验数据时，不按填料表面积而按填料体积计算给热系数，取

$$\alpha_v = \alpha \cdot S$$

式中：α —— 给热系数

S —— 单位填料表面积

α_v —— 容积给热系数

此时 Nu 准数和 Re 准数具如下形式

$$Nu_v = \frac{\alpha_v \cdot d_g^2}{\lambda}$$

$$Re = \frac{W \cdot \gamma \cdot d_g}{\eta \cdot g}$$

式中：d_g —— 当量直径

λ —— 气体的导热系数

W —— 实际的气体流速

η —— 气体的粘度

g —— 重力加速度

在 Re = 150 ~ 1500 范围内

$$Nu_v = 0.3 \times Re^{0.8} \times \epsilon^{0.75}$$

ε^{0.75} 是引入的修正系数，考虑填料粗糙度和形状对气流流动的影响。

ε 为填料的自由容积米³/米³。

简便之式是应用 Караваев 和 Стельмах 公式

$$Nu_v = 0.29 \times Re^{0.88}$$

二公式中的当量直径，流速的选取是不同的。

由公式决定的放热系数，是一个平均的放热系数，它不仅包括了给热本身，而且也包括了滞后作用和石头填料质量对传热之不完全等影响，如果后二者与试验结果差别愈大，那么实际的给热系数与公式的计算值偏差愈大。

分别计算出空气和污气通过填料时的给热系数 α_{v,顺} 和 α_{v,逆}，则总的容积传热系数 K_v 等于：

$$K_v = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{v,顺}} + \frac{1}{\alpha_{v,逆}}}$$

如果具有中部抽气的蓄冷器，求取空气的放热系数中由于蓄冷器下部流速的减小而变化。为此，以抽气口划分分别计算蓄冷器上部的 α_{v,顺上} 和下部的 α_{v,顺下}，如设抽气口距冷端距离为 0.3H (H 为蓄冷器高度)，则空气的给热系数 α_{v,顺} 为：

$$\alpha_{v,顺} = 0.7 \times \alpha_{v,顺上} + 0.3 \times \alpha_{v,顺下}$$

所需石头的体积:

$$V = \frac{Q_{\text{填料}}}{K_v \cdot \Delta T}$$

2. 蛇管的传热系数:

对于紊流状态, 蛇管内气流对管壁的放热系数按下式计算:

$$Nu = 0.023 \times Re^{0.8} \times Pr^{0.4}$$

蛇管外气体对蛇管壁的放热系数按下式计算:

$$\alpha = 69.7 \times W_{H1}^{0.88}$$

式中: W_{H1} ——容积速度, 标准状态下的空筒速度。

蛇管的传热系数:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{内}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{外}}}}$$

按经验数据可取 $K = 25$ 千卡/米²·时·度。

蛇管的表面积:

$$F = \frac{Q_{\text{总}}}{\alpha \cdot K \cdot \Delta T}$$

(四) 抽气口位置的确定

抽气口位置决定于抽气口上、下所需的传热面积(或容积)

以抽气口截面将蓄冷器分成上、下两部份, 两部份的传热方程式为:

$$Q_{\text{上}} = K_{\text{上}} \cdot F_{\text{上}} \cdot \Delta T_{\text{上}}$$

$$Q_{\text{下}} = K_{\text{下}} \cdot F_{\text{下}} \cdot \Delta T_{\text{下}}$$

分别计算出 $Q_{\text{上}}$ 、 $Q_{\text{下}}$ 、 $K_{\text{上}}$ 、 $K_{\text{下}}$ 、 $\Delta T_{\text{上}}$ 、 $\Delta T_{\text{下}}$, 则可决定 $F_{\text{上}}$ 、 $F_{\text{下}}$, 由于 $F_{\text{上}}$ 与 $F_{\text{下}}$ 之比等于高度之比, 因此抽气口位置可定出。

(五) 阻力

1. 填料阻力:

压力降是确定蓄冷器大小的依据, 特别是污氮的压力降, 它决定着空压机的出口压力, 装置的动力消耗。

填料阻力取决于通过填料的气体速度, 气体状态和填料颗粒的尺寸。

填料的阻力计算是在蓄冷器尺寸决定之后。

通过填料的气体的压降:

$$\frac{\Delta P}{L} = f \cdot \frac{\gamma W^2}{g \cdot d_b}$$

式中: $\frac{\Delta P}{L}$ ——单位填料高度的压降 毫米水柱/米

W ——气体的实际速度 米/秒

d_b ——当量直径 米

γ ——气体的平均重度 公斤/米³

f ——摩擦系数

当 Re 小于 60 时为层流状态。60 < Re < 7000 为不稳定紊流状态, 此时摩擦系数按下式确定:

$$f = 9.86 \times \text{Re}^{-0.2}$$

$$\text{Re} = \frac{\gamma \cdot W \cdot d_b}{\eta \cdot g}$$

$$d_b = \frac{4 \cdot \varepsilon}{S}$$

经过变换得:

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{9.86 \times \gamma \times W_0^{1.8} \times v^{0.2}}{g \times d_b^2 \times \varepsilon^{1.8}}$$

式中: W_0 ——空筒速度 米/秒;

v ——运动粘度 米²/秒

蓄冷器填料的阻力:

$$\Delta P = L \cdot \frac{\Delta P}{L}$$

式中: L ——蓄冷器填料层高度 米

对于填料的阻力计算, 仅限于污氮的阻力计算, 计算的结果要符合于流程计算中的估算值。

2. 蛇管阻力:

气体通过蛇管的压力降:

$$\Delta P = \lambda \cdot \frac{L}{d_b} \cdot \frac{\gamma \cdot W^2}{2g}$$

式中: ΔP ——通道的阻力 公斤/米²

λ ——单位通道长度上的摩擦系数

L ——通道长度 米

d_b ——当量直径 米

W ——气体的流速 米/秒

摩擦系数是 Re 数的函数, 当流动状态不同时, 摩擦系数之计算公式也不同。当 $5 \times 10^3 < \text{Re} < 10 \times 10^4$ 时

$$\lambda = 1.2 \times \frac{0.3164}{\text{Re}^{0.25}}$$

公式是应用直管计算公式加以修正而得, 系数1.2即是修正系数。

较为精确的计算可按下列式计算:

$$f = \left[1 + \left(\frac{35.2}{\frac{D}{d} + 37.6} \right)^2 \right] \times \frac{0.3164}{\text{Re}^{0.25}}$$

式中: D ——绕成 D 直径的蛇管

d ——蛇管的半径

蛇管内通过的流体是纯氧和纯氮, 纯氮一般取自辅塔顶部, 其压力比污氮低, 设计蛇管时管内流速不应过大, 致使蛇管阻力大于填料阻力, 会导致装置压力的升高。

(六) 填料的材质

用作填料的石头应有如下要求: 有足够的强度; 操作时填料的磨损小; 温度急剧变化时不应破碎或产生裂缝; 有足够的导热率和热容量; 价廉并易于获得。

采用的石头有：玄武岩、海边卵石、石英石、辉绿岩等，以及玄武岩、辉绿岩的石铸件。国外对石头填料进行了不少试验，提出了性能标准。

苏联制氧机研究院对石头填料提出的要求：比重(2.6~3.2)；比热在(-80~-100)℃时，0.15~0.1千卡/公斤·℃；导热率(-80~-100)℃时，0.5~0.1千卡/米·时·℃；莫氏硬度6~7；常温抗压强度3000~3500公斤/厘米²；低温处理后(液氧中冰冻25次)抗压强度大于室温下90%；疏松度不大于0.3%；磨损0.15~0.3克/厘米²。

日本神户制钢所资料规定：填料形式：近于球状或破碎后其锐角经磨圆的石头；比重大于2.55；吸湿性不大于1.5%；耐磨性：不大于15%；稳定性不大于3%；抗压强度(室温)大于1000公斤/厘米²；低温下的抗压强度(液氧中冰冻15次)大于室温下60%，但最低值大于1000公斤/厘米²。

我国安徽嘉山石头填料特性：抗压强度3657公斤/厘米²，冷冻后抗压强度3641公斤/厘米²，密度2.96克/厘米³，比热0.207千卡/公斤·℃，导热系数1.118千卡/米·时·℃，莫氏硬度6.0，疏松度0.67%，磨损0.1925克/厘米²。

实际应用的石头直径大小在7~15毫米范围内。

石头颗粒的平均尺寸 d_3 ：

$$d_3 = \sqrt[3]{\frac{a \times d_1^3 \times d_2^3}{d_1 + d_2}}$$

式中： d_1 、 d_2 ——石头填料的极大和极小尺寸。

石头填料的单位比表面积 S 米²/米³，即单位体积内表面积取决于石头颗粒直径的大小，可由图9查取。

对于石头填料， $\varepsilon = 0.37 \sim 0.42$ 。

石头直径愈小， S 愈大，能强化热交换，但阻力相应提高。

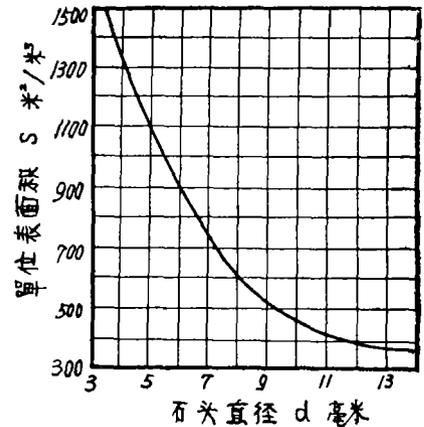


图9

(七) 石头蓄冷器的计算例题

1. 原始数据:

由流程计算给定，数据见下表：

名称	温度 K	压力绝对大气压	流量米³/时	焓千卡/千克分子
入口空气	303	6.18	9050	3266
出口氧气	297	1.05	800	3225
出口纯氮	297	1.05	1000	3225
出口污氮	301	1.05	5450	3255
出口空气	101	6.03	7508.4	1783
入口氧气	93	1.21	800	1795
入口纯氮	93	1.21	1000	1803
入口污氮	97.7	1.21	5450	1832
中部抽出空气	153	6.1	1541.6	2195

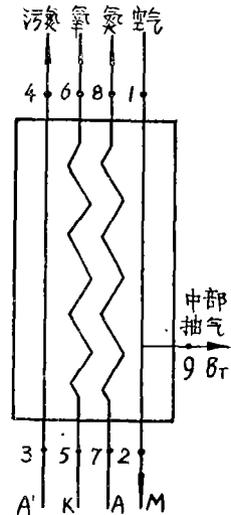


图10

蓄冷器冷损 $q_3=0.5$ 千卡/米³空气。

氧蛇管热负荷:

$$Q_K=102144 \text{ 千卡/时} \quad \text{一对蓄冷器}$$

$$Q_{K_1}=51072 \text{ 千卡/时} \quad \text{一只蓄冷器}$$

氮蛇管热负荷:

$$Q_A=126964 \text{ 千卡/时} \quad \text{一对蓄冷器}$$

$$Q_{A_1}=63482 \text{ 千卡/时} \quad \text{一只蓄冷器}$$

填料热负荷: 一只蓄冷器

$$\begin{aligned} Q_{\text{填}} &= A' \times \frac{(i_4 - i_3)}{22.4} + \frac{1}{2} (Q_A + Q_K) - q_3 \times M \\ &= 5450 \times \frac{(3255 - 1832)}{22.4} + \frac{1}{2} (126964 + 102144) - 0.5 \times 9050 \\ &= 456250 \text{ 千卡/时。} \end{aligned}$$

2. 结构尺寸:

筒体内径 $D=2000$ 毫米

绕管高度 $H=9000$ 毫米

绕管层数 $m=15$

绕管根数 绕管总根数 $n=210$

氧管根数 $n_K=93$

氮管根数 $n_A=117$

绕管规格 $\phi 19 \times 1.5$ T_2-M 铜管。

绕管径向间距:

填条高度 第一层 1 毫米

其余各层 25毫米

绕管径向间距 $t_D=44$ 毫米

绕管纵向间距 $t_H=38$ 毫米

中心管外径 $d=600$ 毫米

绕管平均长度:

绕管总长

$$\begin{aligned} L &= m \cdot K \cdot \pi [d_1 + (m-1)t_D] \\ &= 15 \times 238 \times \pi [0.621 + (15-1) \times 0.044] = 13867 \text{ 米} \end{aligned}$$

式中: m ——绕管层数

K ——绕管圈数

$$K = \frac{H}{t_H} + 1 = \frac{9000}{38} + 1 = 238 \text{ 圈}$$

$d_1=0.621$ ——第一层绕管的平均直径。

每根绕管的平均长度

$$l = \frac{L}{210} = \frac{13867}{210} = 66.03 \text{ 米}$$

填料: 采用天然卵石。

比重 $\gamma = 2550$ 公斤/米³

比表面积 $S = 379$ 米²/米³

粒 度 $d = 9 \sim 12$ 毫米, 平均为 10 毫米。

空 隙 率 $\varepsilon = 36.8\%$

蓄冷器填料装填量:

空筒体积 V_0

$$V_0 = \frac{\pi D^2}{4} \cdot H = 0.785 \times 2^2 \times 9 = 28.26 \text{ 米}^3$$

蛇管、中心管所占体积

$$\begin{aligned} V' &= V_{\text{蛇管}} + V_{\text{中心}} = \frac{\pi}{4} \cdot d_{\text{管}}^2 \cdot L + \frac{\pi}{4} \cdot d_{\text{中心}}^2 \cdot H \\ &= 0.785 \times 0.019^2 \times 13867 + 0.785 \times 0.6^2 \times 9 = 3.93 + 2.54 = 6.47 \text{ 米}^3 \end{aligned}$$

填料装填的体积 $V_{\text{填}}$:

$$V_{\text{填}} = V_0 - V' = 28.26 - 6.47 = 21.79 \text{ 米}^3$$

填料的重量 (每只蓄冷器):

$$G = V_{\text{填}} \cdot (1 - \varepsilon) \cdot \gamma = 21.79 \times (1 - 0.368) \times 2550 = 35100 \text{ 公斤} = 35.1 \text{ 吨}$$

3. 温差:

将纯氧、纯氮和污氮等返流气体视为一股返流气体 (图 11)。

返流气体 G 的出口焓值:

$$i = \frac{5450i_4 + 1600i_6 + 2000i_8}{9050} = 3243 \text{ 千卡/千克分子}$$

返流气体 G 的进口焓值:

$$i = \frac{5450i_3 + 1600i_5 + 2000i_7}{9050} = 1819.05 \text{ 千卡/千克分子}$$

查空气的 T-S 图得:

进口温度 96 K

出口温度 299 K

冷损分配: 抽气口上部 18.5 千卡/时; 下部 2710 千卡/时。

抽气口截面上返流气体 G 的温度:

抽气口上部的热平衡:

$$\begin{aligned} M \times \Delta i_{\text{空气}} + q_3 &= G \times \Delta i_{\text{返流}} \\ \frac{9050(3266 - 2195)}{22.4} + 1815 &= \frac{9050(3243 - x)}{22.4} \end{aligned}$$

$$x = 2167.5 \text{ 千卡/千克分子}$$

查空气的 T-S 图得 $T_x = -145^\circ\text{C}$ 。

(1) 抽气口上部空气、返流气体之间的温差:

冷损均匀分配在 15 段上, 每段 121 千卡/时。

热平衡:

$$M \times \Delta i_{\text{空气}} + \Delta q_3 = G \times \Delta i_{\text{返流}}$$

$$M = G = 9050 \text{ 米}^3/\text{时}$$

$$\Delta i_{\text{空气}} + \frac{1}{M} \cdot \Delta q_3 = \Delta i_{\text{返流}}$$

利用热平衡公式和空气的 T-S 图, 可计算出当空气温度从 303 K 降到 153 K 的各截面上空气和返流气体之间的温差, 计算结果列于表上。

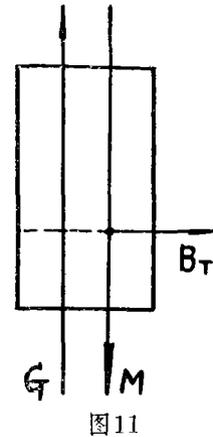


图 11

T _{空气}	i _{空气}	Δi _{空气}	$\frac{\Delta q_3}{9050}$ ($\frac{121 \times 22.4}{9050}$)	$\Sigma \Delta i_{\text{空气}} + \Delta Q_3$ = Δi _{返流}	i _{返流}	T _{返流}	ΔT
303	3266				3243	299	4
300	3243	23	0.1	23.1	3219.9	296	4
290	3172	71	0.3	71.3	3148.6	285.7	4.3
280	3100	72	0.3	72.3	3076.3	275.4	4.6
270	3029	71	0.3	71.3	3005	265.2	4.8
260	2957	72	0.3	72.3	2932.7	254.8	5.2
250	2888	69	0.3	69.3	2863.4	244.8	5.2
240	2817	71	0.3	71.3	2792.1	234.4	5.6
230	2746	71	0.3	71.3	2720.8	224.2	5.8
220	2675	71	0.3	71.3	2649.5	214.1	5.9
210	2605	70	0.3	70.3	2579.2	203.9	6.1
200	2534	71	0.3	71.3	2507.9	193.7	6.3
190	2462	72	0.3	72.3	2435.6	183.1	6.9
180	2391	71	0.3	71.3	2364.3	173	7.0
170	2319	72	0.3	72.3	2292	162.7	7.3
160	2248	71	0.3	71.3	2220.7	152.5	7.5
153	2195	53	0.2	53.2	2167.5	145	8

(2) 抽气口下部空气、返流气体之间的温差:

冷损均匀分配在11段上。210 + 250 × 10 = 2710千卡/时。

热平衡

$$(M - B_T) \times \Delta i_{\text{空气}} + \Delta q_3 = G \times \Delta i_{\text{返流}}$$

$$\Delta i_{\text{返流}} = \frac{7508.4 \times \Delta i_{\text{空气}} + \Delta q_3 \times 22.4}{9050} \quad \text{千卡/千克分子}$$

利用热平衡公式和空气的 T-S 图, 可计算出当空气温度从153K降到101K的各截面上空气和返流气体之间的温差, 计算结果列于表上。

T _{空气}	i _{空气}	Δi _{空气}	$\frac{7508.4 \times \Delta i_{\text{空气}}}{(1)}$	$\frac{\Delta q_3}{(2)}$	Σ1+2	$\frac{\Delta i_{\text{返流}}}{(\frac{22.4+2}{9050})}$	i _{返流}	T _{返流}	ΔT
153	2195						2167.5	145	8
150	2174	21	157676	4704	162380	17.94	2149.56	142.5	7.5
145	3137	37	277810	5600	283410	31.31	2118.25	137.8	7.2
140	2099	38	285319	5600	290919	32.15	2086.1	133.4	6.6
135	2061	38	285319	5600	290919	32.15	2053.95	128.8	6.2
130	2023	38	285319	5600	290919	32.15	2021.8	124.4	5.6

125	1985	38	285319	5600	290919	32.15	1989.65	119.7	5.3
120	1946	39	292828	5600	298428	32.97	1956.68	115	5
115	1907	39	292828	5600	298428	32.97	1923.71	110.5	4.5
110	1865	42	315353	5600	320953	35.46	1888.25	105.7	4.3
105	1820	45	337878	5600	343478	37.95	1850.3	100.2	4.8
101	1783	37	277810	5600	283410	31.31	1818.99	96	5

作 $\Delta T = f(T_{\text{空气}})$ 图 (见图12)。

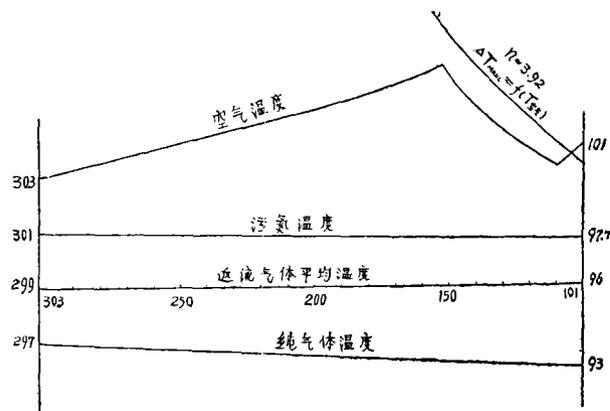


图12

(3) 空气和返流气体之间的对数平均温差:

上部

$$\Delta T_{\text{上}} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{2.3 \lg \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} = \frac{8 - 4}{2.3 \lg \frac{8}{4}} = 5.78^\circ\text{C}$$

下部

由于 $\Delta T = f(T_{\text{空气}})$ 是一上凹曲线, 中间具有最低点, 因此对数平均温差需经几次计算才得, 以最低点分曲线为二段:

地 点	抽 气 口	最 低 点	冷 端
$\Delta T/^\circ\text{C}$	8	4.3	5

$$\Delta T_1 = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{2.3 \lg \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} = \frac{8 - 4.3}{2.3 \lg \frac{8}{4.3}} = 5.97^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_2 = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{2.3 \lg \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} = \frac{5 - 4.3}{2.3 \lg \frac{5}{4.3}} = 4.65^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_{\text{下}} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{2.3 \lg \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}} = \frac{5.97 - 4.65}{2.3 \lg \frac{5.97}{4.65}} = 5.28^\circ\text{C}$$

空气和返流气体之间的对数平均温差

$$\Delta T = \frac{\Delta T_{\text{上}} - \Delta T_{\text{下}}}{2.3 \lg \frac{\Delta T_{\text{上}}}{\Delta T_{\text{下}}}} = \frac{5.78 - 5.28}{2.3 \lg \frac{5.78}{5.28}} = 5.53^{\circ}\text{C}$$

4. 填料的计算:

(1) 返流污氮通过填料时的换热计算:

全部参数按中部条件而定:

$$T = \frac{T_3 + T_4}{2} = \frac{97.7 + 301}{2} = 199.35 \text{ K}$$

$$P = \frac{P_3 + P_4}{2} = \frac{1.21 + 1.05}{2} = 1.13 \text{ 公斤/厘米}^2$$

比重

$$\gamma = \frac{P}{RT} = \frac{1.13 \times 10^4}{30.26 \times 199.35} = 1.875 \text{ 公斤/米}^3$$

式中: $R = 30.26$ 氮的气体常数

粘度 $\eta = 13 \times 10^{-7}$ 公斤·秒/米²

运动粘度 $\nu = \frac{\eta \cdot g}{\gamma} = \frac{13 \times 10^{-7} \times 9.81}{1.875} = 6.8 \times 10^{-6}$ 米²/秒

导热系数 $\lambda = 0.0156$ 千卡/米·时·°C

蓄冷器总截面上污氮速度

$$W = \frac{A' \times \gamma_{\text{H}}}{\frac{\pi}{4} \times D^2 \times \gamma \times 3600} = \frac{5450 \times 1.251}{0.785 \times 2^2 \times 1.875 \times 3600} = 0.322 \text{ 米/秒}$$

式中: $\gamma_{\text{H}} = 1.251$ 标准状况下氮的比重。

Re 数

$$\text{Re} = \frac{W \cdot D}{\nu} = \frac{0.322 \times 10 \times 10^{-3}}{6.8 \times 10^{-6}} = 4.74$$

Nu 数

$$\text{Nu}_v = 0.29 \times \text{Re}^{0.88} = 0.29 \times 474^{0.88} = 65.6。$$

污氮对填料的给热系数

$$\alpha_v = \text{Nu}_v \cdot \frac{\lambda}{d^2} = 65.6 \times \frac{0.0156}{(10 \times 10^{-3})^2} = 10234 \text{ 千卡/米}^3 \cdot \text{时} \cdot ^{\circ}\text{C}$$

(2) 空气通过填料时的换热计算:

由于有中间抽气, 以中部抽气口截面划分为上部和下部, 分别计算。

①上部:

中部条件:

$$T = \frac{T_1 + T_9}{2} = \frac{303 + 153}{2} = 228 \text{ K}$$

$$P = \frac{P_1 + P_9}{2} = \frac{6.18 + 6.1}{2} = 6.14 \text{ 公斤/厘米}^2$$

$$\text{比重: } \gamma = \frac{P}{ZRT} = \frac{6.14 \times 10^4}{0.992 \times 29.27 \times 2.28} = 9.27 \text{ 公斤/米}^3$$

式中: $Z = 0.992$ 压缩性系数

$R = 29.27$ 空气的气体常数

粘度 $\eta = 15.2 \times 10^{-7}$ 公斤·秒/米²

运动粘度

$$\nu = \frac{\eta \cdot g}{\gamma} = \frac{15.2 \times 10^{-7} \times 9.81}{9.27} = 1.61 \times 10^{-6} \text{ 米}^2/\text{秒}$$

导热系数 $\lambda = 0.0174$ 千卡/米·时·℃

蓄冷器总截面上空气速度

$$W = \frac{M \times \gamma_{H_2}}{\frac{\pi}{4} \times D^2 \times \gamma \times 3600} = \frac{9050 \times 1.293}{0.785 \times 2^2 \times 9.27 \times 3600} = 0.112 \text{ 米/秒}$$

式中: $\gamma_{H_2} = 1.293$ 标准状态下空气的比重

Re 数

$$Re = \frac{W \cdot d}{\nu} = \frac{0.112 \times 10 \times 10^{-3}}{1.61 \times 10^{-6}} = 695$$

Nu 数

$$Nu_v = 0.29 \times Re^{0.88} = 0.29 \times 695^{0.88} = 91.9$$

上部空气对填料的给热系数

$$\alpha_v = Nu_v \cdot \frac{\lambda}{d^2} = 91.9 \times \frac{0.0174}{(10 \times 10^{-3})^2} = 16000 \text{ 千卡/米}^3 \cdot \text{时} \cdot \text{℃}$$

②下部:

中部条件

$$T = \frac{T_2 + T_1}{2} = \frac{153 + 101}{2} = 127 \text{ K}$$

$$P = \frac{P_1 + P_2}{2} = \frac{6.1 + 6.03}{2} = 6.065 \text{ 公斤/厘米}^2$$

比重

$$\gamma = \frac{P}{ZRT} = \frac{6.065 \times 10^4}{0.936 \times 29.27 \times 127} = 17.43 \text{ 公斤/米}^3$$

式中: $Z = 0.936$ 压缩性系数

粘度 $\eta = 8.8 \times 10^{-7}$ 公斤·米/米²

运动粘度

$$\nu = \frac{\eta \cdot g}{\gamma} = \frac{8.8 \times 10^{-7} \times 9.81}{17.43} = 4.95 \times 10^{-7} \text{ 米}^2/\text{秒}$$

导热系数 $\lambda = 0.0101$ 千卡/米·时·℃

蓄冷器总截面上空气速度

$$W = \frac{(M - B_T) \times \gamma_{H_2}}{\frac{\pi}{4} \times D^2 \times \gamma \times 3600} = \frac{7508.4 \times 1.293}{0.785 \times 2^2 \times 17.43 \times 3600} = 0.0493 \text{ 米/秒}$$

Re 数

$$Re = \frac{W \cdot d}{\nu} = \frac{0.0493 \times 10 \times 10^{-3}}{4.95 \times 10^{-7}} = 995$$

Nu 数

$$Nu_v = 0.29 \times Re^{0.88} = 0.29 \times 995^{0.88} = 126.2$$

下部空气对填料的给热系数

$$\alpha_v = Nu_v \cdot \frac{\lambda}{d^2} = 126.2 \times \frac{0.0101}{(10 \times 10^{-3})^2} = 12750 \text{ 千卡/米}^3 \cdot \text{时} \cdot \text{°C}$$

③空气对填料的平均给热系数:

$$\alpha_{v,CP} = \alpha_v^{\uparrow} \cdot \frac{H_{\uparrow}}{H} + \alpha_v^{\downarrow} \cdot \frac{H_{\downarrow}}{H}$$

式中: $H_{\uparrow} = 0.72 H$ ——上部的高度

$H_{\downarrow} = 0.28 H$ ——下部的高度

$$\alpha_{v,CP} = 16000 \times 0.72 + 12750 \times 0.28 = 15090 \text{ 千卡/米}^3 \cdot \text{时} \cdot \text{°C}$$

(3) 空气和污氮之间的传热系数:

$$K_v = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{v,空气}} + \frac{1}{\alpha_{v,污氮}}} = \frac{1}{\frac{1}{15090} + \frac{1}{10234}} = 6098 \text{ 千卡/米}^3 \cdot \text{时} \cdot \text{°C}$$

(4) 热负荷:

①填料热负荷 $Q_{\text{填}} = 456250$ 千卡/时

②抽气口上部热负荷:

抽气口截面上由 $\Delta T = f(T_{\text{空气}})$ 图查得纯氧、纯氮的温度为 142.27K, 氧的焓值 $i_K = 2142$ 千卡/千克分子, 氮的焓值 $i_A = 2142$ 千卡/千克分子。

$$\begin{aligned} Q_{\text{上}} &= M(i_1 - i_9) - \frac{1}{2} A \left(i_8 - \frac{2142}{22.4} \right) - \frac{1}{2} K \left(i_6 - \frac{2142}{22.4} \right) \\ &= 9050 \times \frac{(3266 - 2195)}{22.4} - \frac{1}{2} \times 2000 \times \frac{(3255 - 2142)}{22.4} \\ &\quad - \frac{1}{2} \times 1600 \times \frac{(3225 - 2142)}{22.4} = 345676 \text{ 千卡/时} \end{aligned}$$

③抽气口下部热负荷:

$$\begin{aligned} Q_{\text{下}} &= (M - B_T)(i_9 - i_2) - \frac{1}{2} A \left(\frac{2142}{22.4} - i_7 \right) - \frac{1}{2} K \left(\frac{2142}{22.4} - i_5 \right) \\ &= 7508.4 \times \frac{(2195 - 1783)}{22.4} - \frac{1}{2} \times 2000 \times \frac{(2142 - 1803)}{22.4} \\ &\quad - \frac{1}{2} \times 1600 \times \frac{(2142 - 1795)}{22.4} = 110574 \text{ 千卡/时} \end{aligned}$$

(5) 所需填料体积:

$$V = \frac{Q}{K_v \cdot \Delta T} = \frac{456250}{6098 \times 5.53} = 13.53 \text{ 米}^3$$

备用系数

$$\frac{21.79 - 13.53}{13.53} = 61\%$$

(6) 填料阻力计算:

①返流污氮的阻力:

中部条件下: 比重 $\gamma = 1.875$ 公斤/米³

运动粘度 $\nu = 6.8 \times 10^{-6}$ 米²/秒

速度 $W = 0.322$ 米/秒

填料的当量直径

$$d_p = \frac{4 \cdot \Sigma}{S} = \frac{4 \times 0.368}{379} = 3.88 \times 10^{-3} \text{ 米}$$

式中: $\epsilon = 0.368$ 米³/米³ 自由容积 (空隙率)

$S = 379$ 米²/米³ 比表面积

一米填料层高度上污氮的阻力:

$$\begin{aligned} \Delta P' &= \frac{9.86 \times W^{1.8} \times v^{0.2} \times \gamma}{g \times d_p^{1.2} \times \epsilon^{1.8}} = \frac{9.86 \times 0.322^{1.8} \times (6.8 \times 10^{-6})^{0.2} \times 1.875}{9.81 \times (388 \times 10^{-3})^{1.2} \times (0.368)^{1.8}} \\ &= 107 \text{ 公斤/米}^2 \end{aligned}$$

总的阻力:

$$\Delta P = \Delta P' \cdot H = 107 \times 9 = 963 \text{ 公斤/米}^2 = 0.0963 \text{ 公斤/厘米}^2$$

上述阻力在给定允许范围内。

②空气的阻力:

a. 上部

中部条件下: 比重 $\gamma = 9.27$ 公斤/米³

运动粘度 $v = 1.61 \times 10^{-6}$ 米²/秒

速度 $W = 0.112$ 米/秒

当量直径 $d_p = 3.88 \times 10^{-3}$ 米

一米填料层高度上空气的阻力

$$\begin{aligned} \Delta P' &= \frac{9.86 \times W^{1.8} \times v^{0.2} \times \gamma}{g \times d_p^{1.2} \times \epsilon^{1.8}} = \frac{9.86 \times 0.112^{1.8} \times (1.61 \times 10^{-6})^{0.2} \times 9.27}{9.81 \times (3.88 \times 10^{-3})^{1.2} \times (0.368)^{1.8}} \\ &= 59.3 \text{ 公斤/米}^2 \end{aligned}$$

上部总阻力

$$\Delta P = \Delta P' \cdot H_{\text{上}} = 59.3 \times 6.5 = 385.5 \text{ 公斤/米}^2$$

b. 下部:

中部条件下: 比重 $\gamma = 17.43$ 公斤/米³

运动粘度 $v = 4.95 \times 10^{-7}$ 米²/秒

速度 $W = 0.0493$ 米/秒

当量直径 $d_p = 3.88 \times 10^{-3}$ 米

一米填料层高度上空气的阻力

$$\begin{aligned} \Delta P' &= \frac{9.86 \times W^{1.8} \times v^{0.2} \times \gamma}{g \times d_p^{1.2} \times \epsilon^{1.8}} = \frac{9.86 \times 0.0493^{1.8} \times (4.95 \times 10^{-7})^{0.2} \times 17.43}{9.81 \times (3.88 \times 10^{-3})^{1.2} \times (0.368)^{1.8}} \\ &= 20.2 \text{ 公斤/米}^2 \end{aligned}$$

下部总阻力

$$\Delta P = \Delta P' \cdot H_{\text{下}} = 20.2 \times 2.5 = 50.6 \text{ 公斤/米}^2$$

c. 空气通过蓄冷器的阻力:

$$\Delta P = \Delta P_{\text{上}} + \Delta P_{\text{下}} = 385.5 + 50.6 = 436.1 \text{ 公斤/米}^2 = 0.04361 \text{ 公斤/厘米}^2$$

阻力在给定允许范围之内。

5. 绕管的计算:

(1) 氧蛇管内氧对管壁的给热系数:

绕管数 $n_K = 93$ 根, 绕管规格 $\phi 19 \times 1.5$

中部条件

$$T = \frac{T_5 + T_6}{2} = \frac{93 + 279}{2} = 195 \text{ K}$$

$$P = \frac{P_5 + P_6}{2} = \frac{1.21 + 1.05}{2} = 1.13 \text{ 公斤/厘米}^2$$

比重

$$\gamma = \frac{P}{RT} = \frac{1.13 \times 10^4}{26.5 \times 195} = 2.185 \text{ 公斤/米}^3$$

管内流速

$$W = \frac{K \cdot \gamma_H}{\frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot n_H \cdot \gamma} = \frac{800 \times 1.429}{0.785 \times 0.016^2 \times 93 \times 2.185 \times 3600} = 7.78 \text{ 米/秒}$$

式中: $\gamma_H = 1.429$ 标准状况下氧的比重

粘度 $\eta = 14.8 \times 10^{-7}$ 公斤·秒/米²

$$\text{运动粘度 } \nu = \frac{\eta \cdot g}{\gamma} = \frac{14.8 \times 10^{-7} \times 9.81}{2.185} = 6.64 \times 10^{-6} \text{ 米}^2/\text{秒}$$

导热系数 $\lambda = 0.0153$ 千卡/米·时·℃

比热 $C_p = 0.218$ 千卡/公斤·℃

Pr 数

$$Pr = \frac{3600 \times C_p \times g \times \eta}{\lambda} = \frac{3600 \times 0.218 \times 9.81 \times 14.8 \times 10^{-7}}{0.0153} = 0.745$$

Re 数

$$Re = \frac{W \cdot d}{\nu} = \frac{7.78 \times 0.016}{6.64 \times 10^{-6}} = 18750$$

Nu 数

$$Nu = 0.023 \times Re^{0.8} \times Pr^{0.4} = 0.023 \times 18750^{0.8} \times 0.745^{0.4} = 53.57$$

管内给热系数

$$\alpha = Nu \cdot \frac{\lambda}{d} = 53.57 \times \frac{0.0153}{0.016} = 51.23 \text{ 千卡/米}^2 \cdot \text{时} \cdot \text{℃}$$

(2) 氮蛇管内氮对管壁的给热系数:

绕管数 $n_A = 117$ 根, 绕管规格 $\phi 19 \times 1.5$

中部条件

$$T = \frac{T_7 + T_8}{2} = \frac{93 + 297}{2} = 195 \text{ K}$$

$$P = \frac{P_7 + P_8}{2} = \frac{1.21 + 1.05}{2} = 1.13 \text{ 公斤/厘米}^2$$

比重

$$\gamma = \frac{P}{RT} = \frac{1.13 \times 10^4}{30.26 \times 195} = 1.91 \text{ 公斤/米}^3$$

粘度 $\eta = 12.8 \times 10^{-7}$ 公斤·秒/米²

$$\text{运动粘度 } \nu = \frac{\eta \cdot g}{\gamma} = \frac{12.8 \times 10^{-7} \times 9.81}{1.91} = 6.57 \times 10^{-6} \text{ 米}^2/\text{秒}$$

导热系数 $\lambda = 0.0153$ 千卡/米·时·℃

比热 $C_p = 0.251$ 千卡/公斤·℃

管内流速

$$W = \frac{A \cdot \gamma_H}{\frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot n_A \cdot \gamma} = \frac{1000 \times 1.251}{0.785 \times 0.016^2 \times 117 \times 1.91 \times 3600} = 7.75 \text{ 米/秒}$$

式中: $\gamma_H = 1.251$ 标准状况下氮的比重

Re 数

$$Re = \frac{W \cdot d}{\nu} = \frac{7.75 \times 0.016}{6.57 \times 10^{-6}} = 18860$$

Pr 数

$$Pr = \frac{3600 \times C_p \times g \times \eta}{\lambda} = \frac{3600 \times 0.251 \times 9.81 \times 12.8 \times 10^{-7}}{0.0153} = 0.742$$

Nu 数

$$Nu = 0.023 \times Re^{0.8} \times Pr^{0.4} = 0.023 \times 18860^{0.8} \times 0.742^{0.4} = 53.6$$

管内给热系数

$$\alpha = Nu \cdot \frac{\lambda}{d} = 53.6 \times \frac{0.0153}{0.016} = 51.3 \text{ 千卡/米}^2 \cdot \text{时} \cdot \text{°C}$$

(3) 管外气流对蛇管壁的给热系数:

① 污氮对蛇管壁的给热系数:

标准状况下的空筒速度

$$W_{H'} = \frac{A'}{\frac{\pi}{4} \times D^2 \times 3600} = 0.4823 \text{ 米/秒}$$

给热系数

$$\alpha = 69.7 \times W_{H'}^{0.88} = 69.7 \times 0.4823^{0.88} = 36.8 \text{ 千卡/米}^2 \cdot \text{时} \cdot \text{°C}$$

② 空气对蛇管壁的给热系数:

上部:

标准状况下的空筒速度

$$W_{H''} = \frac{M}{\frac{\pi}{4} \times D^2 \times 3600} = \frac{9250}{0.785 \times 2^2 \times 3600} = 0.801 \text{ 米/秒}$$

给热系数

$$\alpha_{上} = 69.7 \times W_{H''}^{0.88} = 69.7 \times 0.801^{0.88} = 57.3 \text{ 千卡/米}^2 \cdot \text{时} \cdot \text{°C}$$

下部:

标准状况下的空筒速度

$$W_{H'''} = \frac{(M - B_T)}{\frac{\pi}{4} \times D^2 \times 3600} = \frac{7508.4}{0.785 \times 2^2 \times 3600} = 0.6644 \text{ 米/秒}$$

给热系数

$$\alpha_{下} = 69.7 \times W_{H'''}^{0.88} = 69.7 \times 0.6644^{0.88} = 48.7 \text{ 千卡/米}^2 \cdot \text{时} \cdot \text{°C}$$

空气对蛇管的给热系数

$$\alpha = 0.72\alpha_{上} + 0.28\alpha_{下} = 0.72 \times 57.3 + 0.28 \times 48.7 = 54.9 \text{ 千卡/米}^2 \cdot \text{时} \cdot \text{°C}$$

(4) 传热系数:

由于管内氧、氮的给热系数相同, 所以氧、氮蛇管的传热面积的确定可一并计算。

① 冷周期内蛇管内外气体间的传热系数:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{管外}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{管内}}}} = \frac{1}{\frac{1}{36.8} + \frac{1}{51.3}} = 21.4 \text{ 千卡/米}^2 \cdot \text{时} \cdot \text{°C}$$

②热周期内蛇管内外气体间的传热系数:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{管外}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{管内}}}} = \frac{1}{\frac{1}{54.9} + \frac{1}{51.3}} = 26.5 \text{ 千卡/米}^2 \cdot \text{时} \cdot \text{°C}$$

(5) 温差:

①热周期内空气和纯气体(氧和氮)之间温差:

由 $\Delta T = f(T_{\text{空气}})$ 图(图12)上得以下数据:

地 点	热 端	抽 气 口	最 低 点	冷 端
$\Delta T \text{°C}$	6	10.7	7.2	8

分段计算, 得对数平均温差

$$\Delta T = 8.18 \text{°C}$$

②冷周期内污氮和纯气体(氧和氮)之间温差

$$\text{冷端 } \Delta T = 4.7 \text{°C}$$

$$\text{热端 } \Delta T = 4 \text{°C}$$

对数平均温差

$$\Delta T = \frac{4.7 - 4}{2.3 \lg \frac{4.7}{4}} = 4.35 \text{°C}$$

(6) 蛇管面积:

热负荷 114553 千卡/时。

传热系数: 冷、热周期的传热系数的平均值

$$K = \frac{K_{\text{冷}} + K_{\text{热}}}{2} = \frac{21.4 + 26.5}{2} = 23.95 \text{ 千卡/米}^2 \cdot \text{时} \cdot \text{°C}。$$

温差: 冷热周期温差的平均值

$$\Delta T = \frac{\Delta T_{\text{冷}} + \Delta T_{\text{热}}}{2} = \frac{4.35 + 8.18}{2} = 6.265 \text{°C}$$

所需蛇管面积

$$F = \frac{Q}{K \cdot \Delta T} = \frac{114553}{23.95 \times 6.265} = 763 \text{ 米}^2$$

实际蛇管的面积

$$F = \pi \cdot d_{\text{CP}} \cdot l \cdot n = 3.14 \times 0.0175 \times 13867 = 763 \text{ 米}^2。$$

式中: l —— 每根蛇管的长度

n —— 蛇管根数

蛇管面积偏小, 结构上应作调整。

(7) 阻力计算:

阻力按下式计算

$$\Delta P = \lambda \cdot \frac{\gamma \cdot W^2}{2g} \cdot \frac{l}{d}$$

紊流状态下蛇管的阻力系数

$$\lambda = 1.2 \times \frac{0.3164}{Re^{0.25}}$$

①氧蛇管的阻力:

由前面计算得

$$\begin{aligned} \gamma &= 2.185 \text{ 公斤/米}^3; & W &= 7.78 \text{ 米/秒}; \\ Re &= 18750; & l &= 66.03 \text{ 米}; & d &= 0.016 \text{ 米}. \end{aligned}$$

$$\lambda = 1.2 \times \frac{0.3164}{(18750)^{0.25}} = 0.0325$$

$$\begin{aligned} \Delta P &= \lambda \cdot \frac{\gamma \cdot W^2}{2g} \cdot \frac{l}{d} = 0.0325 \times \frac{2.185 \times 7.78^2}{2 \times 9.81} \times \frac{66.03}{0.016} = 905 \text{ 公斤/米}^2 \\ &= 0.0905 \text{ 公斤/厘米}^2 \end{aligned}$$

阻力在给定允许范围之内。

②氨蛇管的阻力:

$$\begin{aligned} \gamma &= 1.91 \text{ 公斤/米}^3; & W &= 7.75 \text{ 米/秒}; \\ Re &= 18860; & l &= 66.03 \text{ 米}; & d &= 0.016 \text{ 米}; \end{aligned}$$

$$\lambda = 1.2 \times \frac{0.3164}{(18860)^{0.25}} = 0.0324$$

$$\begin{aligned} \Delta P &= \lambda \cdot \frac{\gamma \cdot W^2}{2g} \cdot \frac{l}{d} = 0.0324 \times \frac{1.91 \times 7.75^2}{2 \times 9.81} \times \frac{66.03}{0.016} = 781 \text{ 公斤/米}^2 \\ &= 0.0781 \text{ 公斤/厘米}^2 \end{aligned}$$

阻力在给定允许范围之内。

6. 抽气口位置:

由上面计算得:

$$\text{抽气口上部热负荷 } Q_{\text{上}} = 345676 \text{ 千卡/时}$$

$$\text{抽气口下部热负荷 } Q_{\text{下}} = 110574 \text{ 千卡/时}$$

空气和返回气体之间的对数温差

$$\text{上部 } 5.78^\circ\text{C}$$

$$\text{下部 } 5.28^\circ\text{C}$$

空气和污氮之间的传热系数

$$\text{上部 } K_{\text{上}} = \frac{1}{\frac{1}{10234} + \frac{1}{16000}} = 6242 \text{ 千卡/米}^2 \cdot \text{时} \cdot ^\circ\text{C}$$

$$\text{下部 } K_{\text{下}} = \frac{1}{\frac{1}{10234} + \frac{1}{12750}} = 5677 \text{ 千卡/米}^2 \cdot \text{时} \cdot ^\circ\text{C}$$

抽气口上部和下部的体积比

$$\begin{aligned} \frac{V_{\text{上}}}{V_{\text{下}}} &= \frac{Q_{\text{上}}}{K_{\text{上}} \cdot \Delta T_{\text{上}}} \cdot \frac{K_{\text{下}} \cdot \Delta T_{\text{下}}}{Q_{\text{下}}} = \frac{345676}{6242 \times 5.78} \times \frac{5677 \times 5.28}{110574} \\ &= \frac{9.581}{3.686} \approx 2.6 \end{aligned}$$

$$\frac{V_{上}}{V_{下}} = \frac{H_{上}}{H_{下}}$$

$$H_{上} + H_{下} = H$$

式中：H_上——抽气口上部高度

H_下——抽气口下部高度

$$H_{下} \times [1 + 2.6] = 9$$

$$H_{下} = 2.5 \text{ 米}$$

$$H_{上} = 6.5 \text{ 米}$$

7. 绕管特性表：

绕管的结构设计类似盘管热交换器，绕管均匀嵌入石头填料之中，其径向间距和纵向间距应能保证石头嵌入，绕管特性表列于下表：

层数	每层平均直径 (毫米)	每层根数	各通道根数		旋向	每根蛇管长度 (毫米)	圈数	纵向间距 (毫米)	中间抽气处间距 (毫米)	垫片数
			氧	氮						
1	621	7		7	右	66030	33.85	36.92	250	12
2	709	8	8		左	66030	29.65	36.89	250	12
3	797	9		9	右	66030	26.4	36.83	250	12
4	885	10	10		左	66030	23.75	36.84	250	12
5	973	11		11	右	66030	21.6	36.83	250	12
6	1061	12	12		左	66030	19.8	36.83	250	12
7	1149	13		13	右	66030	18.3	36.78	250	12
8	1237	14	14		左	66030	17	36.76	250	12
9	1325	15		15	右	66030	15.85	36.8	250	12
10	1413	16	16		左	66030	14.80	36.83	250	12
11	1501	17		17	右	66030	14	36.76	250	12
12	1589	18	18		左	66030	13.2	36.83	250	12
13	1677	19		19	右	66030	12.5	36.81	250	12
14	1765	20	15	5	左	66030	11.9	36.76	250	12
15	1853	21		21	右	66030	11.3	36.87	250	12

8. 蓄冷器的不冻结性计算：

(1) n值的计算：

抽气口以下的 n

$$n = \frac{P_{正} \cdot V_{返}}{P_{返} \cdot V_{正}} = \frac{6.105 \times 5450}{1.13 \times 7508.4} = 3.92$$

(2) 计算 $\Delta T_{最大} = f(T_{空气})$ 曲线：

按照不被 CO₂ 冻结的条件： $P_{冷} = \frac{1}{n} \cdot P_{热} = \frac{1}{3.92} \cdot P_{热}$ ，以及表 2 数据，计算出当空气温度从 160K 降到 101K 的各截面上空气和冷气体的允许的最大温差，计算结果列于表上。

空 气 (K)	P (毫米汞柱)	$P' = \frac{1}{n} P$ (毫米汞柱)	T' (K)	ΔT (K)
160	22.8	5.816	149.58	10.42
153	9.3	2.37	143.45	9.55
150	6.15	1.57	140.75	9.25
145	3	7.65×10^{-1}	136.4	8.6
140	1.38	3.52×10^{-1}	132	8
135	6×10^{-1}	1.53×10^{-1}	127.63	7.37
130	2.41×10^{-1}	6.148×10^{-2}	123.11	6.89
125	9.05×10^{-2}	2.31×10^{-2}	118.6	6.4
120	3.15×10^{-2}	8.035×10^{-3}	114.08	5.92
115	1×10^{-2}	2.55×10^{-3}	109.5	5.5
110	2.9×10^{-3}	7.4×10^{-4}	104.92	5.08
105	7.55×10^{-4}	1.926×10^{-4}	100.3	4.7
101	2.37×10^{-4}	6.046×10^{-5}	96.64	4.36

(3) 将 $\Delta T_{\text{最大}} = f(T_{\text{空气}})$ 曲线画在温差曲线: $\Delta T = f(T_{\text{空气}})$ 图上, 在 $T_{\text{空气}} = 105\text{K}$ 处有一交点, 这是不许可的, 主要是返流纯氧、纯氮的温度给定太低, 流程中应进行调整, 重作计算。

后 语

国内关于石头蓄冷器的计算方法有几种, 文中所述的方法未必完善, 望开展讨论。

参 考 资 料

- [1] 3200 米³/时空分装置设计计算书
- [2] Кислород справочник
- [3] 堆积填料蓄冷器文献小结 杭州制氧机研究所
- [4] 《深冷简报》1966 年第 2 期 “石头填料蓄冷器的试验研究”
- [5] 《深冷简报》1970 年第 2 期 “深冷设计图表”
- [6] 深度冷冻手册 (中译本)