

# 第 16 篇 增湿、减湿及水冷却

主稿人 时 钧 南京化工学院 教授 中国科学院 院士

编写人 姚虎卿 南京化工学院 教授

|                           |       |             |                       |       |
|---------------------------|-------|-------------|-----------------------|-------|
| 符号说明                      | 16-2  | 3.5         | 横流式增湿与减湿过程            | 16-23 |
| 1 绪论                      | 16-2  | 3.6         | 增湿与减湿过程的设计            | 16-25 |
| 1.1 气体增湿与减湿的方法            | 16-2  | 3.6.1       | 工艺参数的选择               | 16-25 |
| 1.2 气体增湿与减湿过程的应用          | 16-3  | 3.6.2       | 增减湿设备的设计              | 16-25 |
| 1.2.1 循环水的冷却              | 16-3  | 3.6.3       | 辅助设备的设计与选型            | 16-25 |
| 1.2.2 气体的降温与除尘            | 16-3  | 4           | 循环水冷却塔                | 16-26 |
| 1.2.3 可凝蒸汽冷凝潜热的回收和利用      | 16-3  | 4.1         | 工业循环水冷却的方法            | 16-26 |
| 1.2.4 溶剂回收                | 16-3  | 4.2         | 湿式冷却塔的类型与结构参数         | 16-26 |
| 1.2.5 空气调湿                | 16-4  | 4.2.1       | 冷却塔的类型                | 16-26 |
| 2 湿气体的性质及湿度图表             | 16-4  | 4.2.2       | 填料                    | 16-27 |
| 2.1 湿气体的性质                | 16-4  | 4.2.3       | 机械通风式冷却塔结构及操作参数的选择    | 16-28 |
| 2.1.1 湿气体的基本状态参数          | 16-4  | 4.3         | 气象参数                  | 16-30 |
| 2.1.2 绝热饱和温度与湿球温度         | 16-7  | 4.4         | 冷却塔的热力计算及热力特性         | 16-30 |
| 2.1.3 湿度的测定方法             | 16-9  | 4.4.1       | 逆流式冷却塔的热力计算           | 16-31 |
| 2.2 湿气体的湿度图及其应用           | 16-10 | 4.4.2       | 横流式冷却塔的热力计算           | 16-35 |
| 2.2.1 湿空气的 $t$ - $H$ 图    | 16-10 | 4.4.3       | 冷却塔的热力特性              | 16-37 |
| 2.2.2 高温下湿气体的 $t$ - $H$ 图 | 16-12 | 4.4.4       | 冷却塔热力与动力的综合计算方法       | 16-39 |
| 2.2.3 湿空气的 $I$ - $H$ 图    | 16-13 | 4.5         | 冷却塔的通风阻力及阻力特性         | 16-40 |
| 2.2.4 总压对湿气体性质的影响         | 16-13 | 4.5.1       | 填料层的通风阻力及阻力特性         | 16-41 |
| 3 增湿与减湿过程的计算基础            | 16-15 | 4.5.2       | 冷却塔的局部通风阻力            | 16-42 |
| 3.1 气体与液体间的传热与传质关系        | 16-15 | 4.6         | 冷却塔的辅助设备              | 16-46 |
| 3.1.1 增湿过程中的传热与传质关系       | 16-15 | 4.6.1       | 通风设备                  | 16-46 |
| 3.1.2 减湿过程中的传热与传质关系       | 16-16 | 4.6.2       | 配水装置                  | 16-46 |
| 3.1.3 传热与传质速率方程           | 16-16 | 4.7         | 循环冷却水的补充水量            | 16-47 |
| 3.2 气液平衡线与操作线             | 16-17 | 4.7.1       | 蒸发损失的水量               | 16-47 |
| 3.3 气液相界面参数及气体参数在塔内的分布    | 16-19 | 4.7.2       | 通风损失的水量               | 16-47 |
| 3.3.1 气液相界面参数             | 16-19 | 4.7.3       | 渗漏损失的水量               | 16-48 |
| 3.3.2 气液相界面及气体参数在塔内的分布    | 16-19 | 4.7.4       | 排污损失的水量               | 16-48 |
| 3.3.3 气液相界面参数及气温在塔内分布的图解法 | 16-20 | 5 传热与传质速率数据 |                       | 16-48 |
| 3.4 有效塔高的计算               | 16-21 | 5.1         | 填料塔传热与传质系数的实验关联式和实测数据 | 16-48 |

|                                  |       |
|----------------------------------|-------|
| 5.1.1 逆流塔传热与传质的关联式和<br>实测数据····· | 16—48 |
| 5.1.2 横流塔的传质关联式和实测数据·····        | 16—52 |

|                                    |       |
|------------------------------------|-------|
| 5.2 喷雾塔传热与传质系数的实验关联式<br>和实测数据····· | 16—55 |
| 参考文献·····                          | 16—57 |

## 符号说明

|                 |          |                            |
|-----------------|----------|----------------------------|
| $a$             | 相接触面积    | $m^2/m^3$                  |
| $C$             | 比热       | $kJ/(kg \cdot K)$          |
| $C_H$           | 湿比热      | $kJ/(kg_d \cdot K)$        |
| $D$             | 扩散系数     | $m^2/s$                    |
| $F$             | 截面积      | $m^2$                      |
| $G$             | 干气体的质量流速 | $kg/(m^2 \cdot h)$         |
| $G_0$           | 干气体的流量   | $kg/h$                     |
| $g$             | 重力加速度    | $m/s^2$                    |
| $H$             | 湿度       | $kg_v/kg_d$                |
| $H_G, H_L, H_I$ | 传递单元高度   | $m$                        |
| $I$             | 湿气体的焓    | $kJ/kg_d$                  |
| $k_{Ha}$        | 气相传质系数   | $kg/(m^3 \cdot h)$         |
| $L$             | 液体的质量流速  | $kg/(m^2 \cdot h)$         |
| $L_0$           | 液体的流量    | $kg/h$                     |
| $Le$            | Lewis 准数 | —                          |
| $M$             | 分子量      | —                          |
| $N$             | 传质速率     | $kg/(m^2 \cdot h)$         |
| $N_G, N_L, N_I$ | 传递单元数    | —                          |
| $P$             | 总压       | $kPa$                      |
| $p$             | 分压       | $kPa$                      |
| $R$             | 半径       | $m$                        |
| $r$             | 可凝蒸汽的冷凝热 | $kJ/kg$                    |
| $t$             | 温度       | $K$                        |
| $t_w$           | 湿球温度     | $K$                        |
| $u$             | 流体线速度    | $m/s$                      |
| $V$             | 体积       | $m^3$                      |
| $v_H$           | 湿气体的比容   | $m^3/kg_d$                 |
| $X$             | 长度       | $m$                        |
| $Z$             | 高度       | $m$                        |
| $\alpha$        | 传热膜系数    | $kJ/(m^2 \cdot h \cdot K)$ |
| $\beta$         | 水的损失分率   | —                          |
| $\lambda$       | 导热系数     | $kJ/(m \cdot h \cdot K)$   |
| $\lambda$       | 气水比      | $kg/kg$                    |
| $\mu$           | 粘度       | $kg/(m \cdot s)$           |
| $\xi$           | 流体阻力系数   | —                          |
| $\rho$          | 密度       | $kg/m^3$                   |
| $\varphi$       | 相对湿度     | —                          |
| $\psi$          | 饱和度      | —                          |
| $\Omega$        | 冷却数      | —                          |
| $\theta$        | 雾化角      | °                          |

## 下 标

|     |        |
|-----|--------|
| $d$ | ——干基   |
| $g$ | ——气体   |
| $i$ | ——相界面  |
| $L$ | ——液体   |
| $S$ | ——饱和状态 |
| $V$ | ——可凝蒸汽 |

## 1 绪 论

增湿与减湿是指可凝蒸汽在某一物质中含量的增加与减少,这种物质可以是气体、液体或固体。但通常所指的增湿与减湿是不凝气体中可凝蒸汽含量的变化,亦称气体的增湿与减湿,其中不凝者为“干”气体,可凝者为“湿”组分,最常见的湿组分是水蒸汽。例如,在空气与水蒸汽的气体混合物中,空气为干气体,水蒸汽为湿组分,当空气中的水蒸汽含量增加时,称为增湿;反之则为减湿。

水冷却通常是指作为冷却介质使用后的温水,经与空气直接接触,使空气增湿达到水冷却的目的。

### 1.1 气体增湿与减湿的方法

使气体增湿的方法主要有两种:一是向气体中喷入可凝蒸汽;另一种方法是用高于气体中可凝蒸汽露点的同种液体与气体直接接触,使液体蒸发而增湿。

使气体减湿的方法按其原理可分为如下四种:①冷凝减湿——湿气体与低于其可凝蒸汽露点的液体或固体壁面接触使湿组分冷凝;②吸收减湿——湿气体与具有吸湿性的液体或固体(如浓硫酸、氢氧化钾、氯化钙等)接触,进行化学或物理吸收;③吸附减湿——用固体吸附剂(如硅胶、分子筛、活性炭等)吸附气体中的可凝蒸汽;④压缩减湿——将湿气体压缩到一定的压力,再间接冷却到可凝蒸汽的露点以下的温度,使其冷凝而减湿。

本篇主要讨论湿气体与其可凝组分相同的液体直接接触,使该气体实现增湿或减湿的过程;并讨论空气与水直接接触使水冷却的过程。

# 第 16 篇 增湿、减湿及水冷却

主稿人 时 钧 南京化工学院 教授 中国科学院 院士

编写人 姚虎卿 南京化工学院 教授

|                           |       |             |                       |       |
|---------------------------|-------|-------------|-----------------------|-------|
| 符号说明                      | 16-2  | 3.5         | 横流式增湿与减湿过程            | 16-23 |
| 1 绪论                      | 16-2  | 3.6         | 增湿与减湿过程的设计            | 16-25 |
| 1.1 气体增湿与减湿的方法            | 16-2  | 3.6.1       | 工艺参数的选择               | 16-25 |
| 1.2 气体增湿与减湿过程的应用          | 16-3  | 3.6.2       | 增减湿设备的设计              | 16-25 |
| 1.2.1 循环水的冷却              | 16-3  | 3.6.3       | 辅助设备的设计与选型            | 16-25 |
| 1.2.2 气体的降温与除尘            | 16-3  | 4           | 循环水冷却塔                | 16-26 |
| 1.2.3 可凝蒸汽冷凝潜热的回收和利用      | 16-3  | 4.1         | 工业循环水冷却的方法            | 16-26 |
| 1.2.4 溶剂回收                | 16-3  | 4.2         | 湿式冷却塔的类型与结构参数         | 16-26 |
| 1.2.5 空气调湿                | 16-4  | 4.2.1       | 冷却塔的类型                | 16-26 |
| 2 湿气体的性质及湿度图表             | 16-4  | 4.2.2       | 填料                    | 16-27 |
| 2.1 湿气体的性质                | 16-4  | 4.2.3       | 机械通风式冷却塔结构及操作参数的选择    | 16-28 |
| 2.1.1 湿气体的基本状态参数          | 16-4  | 4.3         | 气象参数                  | 16-30 |
| 2.1.2 绝热饱和温度与湿球温度         | 16-7  | 4.4         | 冷却塔的热力计算及热力特性         | 16-30 |
| 2.1.3 湿度的测定方法             | 16-9  | 4.4.1       | 逆流式冷却塔的热力计算           | 16-31 |
| 2.2 湿气体的湿度图及其应用           | 16-10 | 4.4.2       | 横流式冷却塔的热力计算           | 16-35 |
| 2.2.1 湿空气的 $t$ - $H$ 图    | 16-10 | 4.4.3       | 冷却塔的热力特性              | 16-37 |
| 2.2.2 高温下湿气体的 $t$ - $H$ 图 | 16-12 | 4.4.4       | 冷却塔热力与动力的综合计算方法       | 16-39 |
| 2.2.3 湿空气的 $I$ - $H$ 图    | 16-13 | 4.5         | 冷却塔的通风阻力及阻力特性         | 16-40 |
| 2.2.4 总压对湿气体性质的影响         | 16-13 | 4.5.1       | 填料层的通风阻力及阻力特性         | 16-41 |
| 3 增湿与减湿过程的计算基础            | 16-15 | 4.5.2       | 冷却塔的局部通风阻力            | 16-42 |
| 3.1 气体与液体间的传热与传质关系        | 16-15 | 4.6         | 冷却塔的辅助设备              | 16-46 |
| 3.1.1 增湿过程中的传热与传质关系       | 16-15 | 4.6.1       | 通风设备                  | 16-46 |
| 3.1.2 减湿过程中的传热与传质关系       | 16-16 | 4.6.2       | 配水装置                  | 16-46 |
| 3.1.3 传热与传质速率方程           | 16-16 | 4.7         | 循环冷却水的补充水量            | 16-47 |
| 3.2 气液平衡线与操作线             | 16-17 | 4.7.1       | 蒸发损失的水量               | 16-47 |
| 3.3 气液相界面参数及气体参数在塔内的分布    | 16-19 | 4.7.2       | 通风损失的水量               | 16-47 |
| 3.3.1 气液相界面参数             | 16-19 | 4.7.3       | 渗漏损失的水量               | 16-48 |
| 3.3.2 气液相界面及气体参数在塔内的分布    | 16-19 | 4.7.4       | 排污损失的水量               | 16-48 |
| 3.3.3 气液相界面参数及气温在塔内分布的图解法 | 16-20 | 5 传热与传质速率数据 |                       | 16-48 |
| 3.4 有效塔高的计算               | 16-21 | 5.1         | 填料塔传热与传质系数的实验关联式和实测数据 | 16-48 |

|                                  |       |
|----------------------------------|-------|
| 5.1.1 逆流塔传热与传质的关联式和<br>实测数据····· | 16—48 |
| 5.1.2 横流塔的传质关联式和实测数据·····        | 16—52 |

|                                    |       |
|------------------------------------|-------|
| 5.2 喷雾塔传热与传质系数的实验关联式<br>和实测数据····· | 16—55 |
| 参考文献·····                          | 16—57 |

## 符号说明

|                 |          |                            |
|-----------------|----------|----------------------------|
| $a$             | 相接触面积    | $m^2/m^3$                  |
| $C$             | 比热       | $kJ/(kg \cdot K)$          |
| $C_H$           | 湿比热      | $kJ/(kg_d \cdot K)$        |
| $D$             | 扩散系数     | $m^2/s$                    |
| $F$             | 截面积      | $m^2$                      |
| $G$             | 干气体的质量流速 | $kg/(m^2 \cdot h)$         |
| $G_0$           | 干气体的流量   | $kg/h$                     |
| $g$             | 重力加速度    | $m/s^2$                    |
| $H$             | 湿度       | $kg_v/kg_d$                |
| $H_G, H_L, H_I$ | 传递单元高度   | $m$                        |
| $I$             | 湿气体的焓    | $kJ/kg_d$                  |
| $k_{Ha}$        | 气相传质系数   | $kg/(m^3 \cdot h)$         |
| $L$             | 液体的质量流速  | $kg/(m^2 \cdot h)$         |
| $L_0$           | 液体的流量    | $kg/h$                     |
| $Le$            | Lewis 准数 | —                          |
| $M$             | 分子量      | —                          |
| $N$             | 传质速率     | $kg/(m^2 \cdot h)$         |
| $N_G, N_L, N_I$ | 传递单元数    | —                          |
| $P$             | 总压       | $kPa$                      |
| $p$             | 分压       | $kPa$                      |
| $R$             | 半径       | $m$                        |
| $r$             | 可凝蒸汽的冷凝热 | $kJ/kg$                    |
| $t$             | 温度       | $K$                        |
| $t_w$           | 湿球温度     | $K$                        |
| $u$             | 流体线速度    | $m/s$                      |
| $V$             | 体积       | $m^3$                      |
| $v_H$           | 湿气体的比容   | $m^3/kg_d$                 |
| $X$             | 长度       | $m$                        |
| $Z$             | 高度       | $m$                        |
| $\alpha$        | 传热膜系数    | $kJ/(m^2 \cdot h \cdot K)$ |
| $\beta$         | 水的损失分率   | —                          |
| $\lambda$       | 导热系数     | $kJ/(m \cdot h \cdot K)$   |
| $\lambda$       | 气水比      | $kg/kg$                    |
| $\mu$           | 粘度       | $kg/(m \cdot s)$           |
| $\xi$           | 流体阻力系数   | —                          |
| $\rho$          | 密度       | $kg/m^3$                   |
| $\varphi$       | 相对湿度     | —                          |
| $\psi$          | 饱和度      | —                          |
| $\Omega$        | 冷却数      | —                          |
| $\theta$        | 雾化角      | °                          |

## 下 标

|     |        |
|-----|--------|
| $d$ | ——干基   |
| $g$ | ——气体   |
| $i$ | ——相界面  |
| $L$ | ——液体   |
| $S$ | ——饱和状态 |
| $V$ | ——可凝蒸汽 |

## 1 绪 论

增湿与减湿是指可凝蒸汽在某一物质中含量的增加与减少,这种物质可以是气体、液体或固体。但通常所指的增湿与减湿是不凝气体中可凝蒸汽含量的变化,亦称气体的增湿与减湿,其中不凝者为“干”气体,可凝者为“湿”组分,最常见的湿组分是水蒸汽。例如,在空气与水蒸汽的气体混合物中,空气为干气体,水蒸汽为湿组分,当空气中的水蒸汽含量增加时,称为增湿;反之则为减湿。

水冷却通常是指作为冷却介质使用后的温水,经与空气直接接触,使空气增湿达到水冷却的目的。

### 1.1 气体增湿与减湿的方法

使气体增湿的方法主要有两种:一是向气体中喷入可凝蒸汽;另一种方法是用高于气体中可凝蒸汽露点的同种液体与气体直接接触,使液体蒸发而增湿。

使气体减湿的方法按其原理可分为如下四种:①冷凝减湿——湿气体与低于其可凝蒸汽露点的液体或固体壁面接触使湿组分冷凝;②吸收减湿——湿气体与具有吸湿性的液体或固体(如浓硫酸、氢氧化钾、氯化钙等)接触,进行化学或物理吸收;③吸附减湿——用固体吸附剂(如硅胶、分子筛、活性炭等)吸附气体中的可凝蒸汽;④压缩减湿——将湿气体压缩到一定的压力,再间接冷却到可凝蒸汽的露点以下的温度,使其冷凝而减湿。

本篇主要讨论湿气体与其可凝组分相同的液体直接接触,使该气体实现增湿或减湿的过程;并讨论空气与水直接接触使水冷却的过程。

## 1.2 气体增湿与减湿过程的应用

气体与液体直接接触使气体增湿或减湿,以及空气与水直接接触使水冷却,这两种过程的应用主要有如下几个方面。

### 1.2.1 循环水的冷却

在化工、电力、冶金等工业和其它工程设施中广泛地使用水作为冷却介质,为节省水源,使用后的温水经与空气直接接触而冷却,以循环使用。循环水的冷却通常采用湿式冷却塔来实现,如图1-1所示。这一过程通称为水冷却过程,空气经冷却塔增湿并升温,从而使水冷却。本篇第4章将详细地讨论这一过程。

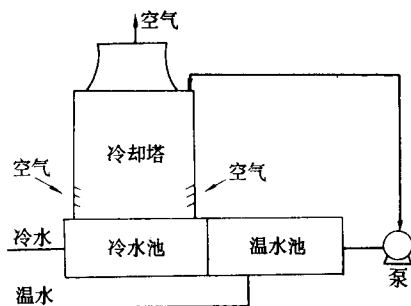


图 1-1 水冷却过程示意图

### 1.2.2 气体的降温与除尘

对于煤气、炉气等含有灰尘的高温气体,可以用水进行洗涤,使其降温与除尘。这种直接洗涤气体的特点是传热效率高。且节省了单独设置气体除尘的设备。洗涤用的装置过去多为木格填料塔,现在主要采用喷雾塔,以降低气体在洗涤过程中的阻力,并避免灰尘在塔内堵塞。气体经洗涤冷却时多为减湿过程;但当气体中原来的水蒸汽含量很少时,也可能是增湿过程。水经洗涤塔后温度升高,若需循环使用,则可用冷却塔进行冷却,组合成水的加热与冷却的循环系统,其循环流程示于图1-2。

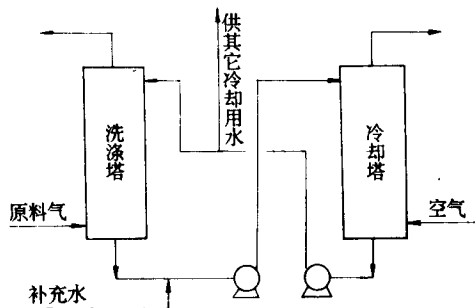


图 1-2 洗涤塔与冷却塔的水循环系统示意图

### 1.2.3 可凝蒸汽冷凝潜热的回收和利用

湿气体中的可凝蒸汽与低于其露点的同种液体直接接触时,蒸汽将冷凝释放出潜热使液温升高,被加热的液体就可以作为热源利用。典型的例子为合成氨生产中一氧化碳变换工序所用的饱和塔与热水塔系统。该系统示于图1-3,两个塔叠加在一起,塔径相等,而塔高不等。含有大量水蒸汽的湿变换气在热水塔内与水直接接触,变换气中的水蒸汽冷凝释放出潜热,同时气体降温向水传递显热,使水温升高。被加热的热水再经间接换热器后送至饱和塔,与半水煤气接触使气体升温并增湿,以提供一氧化碳变换反应所需的水蒸汽,水经饱和塔冷却后再流到热水塔循环使用。在此过程中,水为热量的载体,在热水塔内回收热量,而在饱和塔内利用其热量产生水蒸汽。这一过程不仅传热效率高,而且不需设置锅炉就可以得到水蒸汽。在这个系统中,半水煤气通过饱和塔与水接触为增湿过程;变换气通过热水塔与水接触为减湿过程。

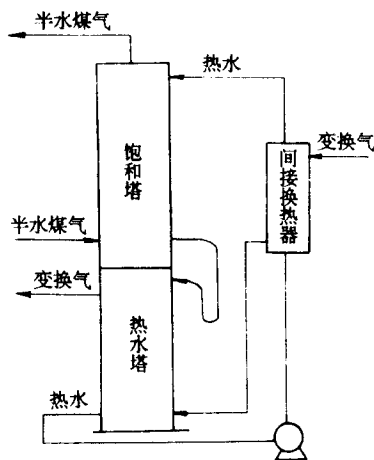


图 1-3 加压下操作的饱和塔与热水塔系统

### 1.2.4 溶剂回收

气体中含有的某些可凝蒸汽(如苯、甲醇、二氯乙烯等),可以用低于其露点的同种液体与气体直接接触,使可凝蒸汽冷凝下来予以回收,这是一种较为简单地回收溶剂的方法。例如,在甲醇生产过程排放的废气中含有较多的甲醇蒸汽,采用冷甲醇液体洗涤该气体,就可以将气体中的甲醇冷凝下来,以降低废气中甲醇蒸汽的含量,从而减少了甲醇的损失。显然,这种回收溶剂的方法为气体的减湿过程,所用的装置一般为填料塔或板式塔。

### 1.2.5 空气调湿

空气调湿指调节房屋内部或某一空间空气中的水蒸气含量。在调节湿度的同时,往往伴随着调节温度。空气调湿的具体应用主要有如下几个方面:①控制吸湿性物料的湿度;②保持仪器具有较高精密度所需要的湿度;③控制生物化学反应或金属腐蚀的速度;④满足实验室的环境要求;⑤消除静电影响;⑥调节工作室内的湿度。

空气调湿既可以是增湿过程,又可以是减湿过程。调湿装置视其用途不同而有多种型式,图1-4是空气调湿装置的基本组成示意图。一般通过调节空气的流量、喷入的水量以及加热或冷却的负荷来满足不同的湿度和温度。

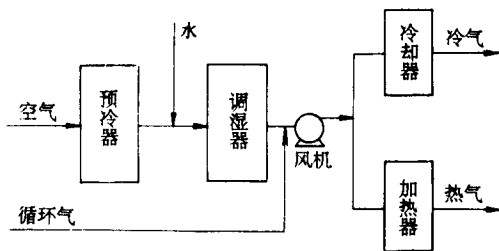


图 1-4 空气调节装置示意图

综合上述各种气体与液体直接接触的增湿与减湿过程看出,它们的共同特点是在气体与液体两相之间同时发生热量传递和质量传递,以满足气体的温度及可凝蒸汽湿度变化的要求,或满足液体温度变化的要求;这种过程的装置都比较简单,且有较快的传热速率。

增湿、减湿及水冷却过程均是由两个相和两种组分所组成的体系,在气相中的组分是不凝的干气和可凝蒸汽;在液相中则是与可凝蒸汽相同的单一组分。虽然,在气体和液体中还可能混有其他组分,在气液接触过程中,也可能有某些杂质发生溶解或汽化,但这些组分及其发生的变化均是不予考虑的。

本篇后面各章主要介绍增湿、减湿及水冷却的基本理论和计算方法以及循环水冷却过程,其他各类增湿与减湿过程仅举例说明。为便于读者查阅有关增湿、减湿及水冷却方面的内容,现列出如下几本著作:

- ①藤田重文,化学工学Ⅲ(日),楳书店,1963.
- ②内田秀雄著,湿り空气と冷却塔,裳华房,1963.
- ③化学工学协会编,“化学工学便览”(改订四版),丸善株式会社,1978.
- ④N. P. 彻雷密西诺夫等著,《凉水塔(中译本)》,石油工业出版社,1984.
- ⑤Perry, J. H., “Chemical Engineers’ Handbook”, 6th

ed., McGraw-Hill, New-York, 1984.

⑥薛殿华主编,《空气调节》,清华大学出版社,1991。

## 2 湿气体的性质及湿度图表

### 2.1 湿气体的性质

在气体的增湿、减湿及水冷却过程中,湿气体中的可凝蒸汽发生变化,而干气作为载气,它的质量认为是不变的。因此,为了计算方便,有关湿气体的参数多以单位质量的干气为基准。本节介绍湿气体诸参数的物理意义及其相互之间的关系,并介绍湿度的测定方法。

#### 2.1.1 湿气体的基本状态参数

##### (1) 湿度

气体中可凝蒸汽的含量称为湿度,又称湿含量或绝对湿度,它以单位质量干气体中可凝蒸汽的质量来表示。对于理想气体,湿度可表示为

$$H = \frac{G_v}{G_d} = \frac{M_v}{M_d} \frac{p_v}{P - p_v} \quad (2-1)$$

式中  $H$ ——湿度, kg 可凝蒸汽/kg 干气 (kg./kg.);

$G_v$ 、 $G_d$ ——分别为可凝蒸汽和干气体的质量, kg;

$M_v$ 、 $M_d$ ——分别为可凝蒸汽和干气体的分子量;

$P$ 、 $p_v$ ——分别为湿气体的总压和可凝蒸汽的分压, kPa。

对于空气中所含的水蒸汽,其湿度为

$$H = \frac{18.016}{28.96} \frac{p_v}{P - p_v} = 0.622 \frac{p_v}{P - p_v} \quad (2-2)$$

##### (2) 相对湿度与饱和度

湿气体中的可凝蒸汽分压  $p_v$  与同温度下可凝蒸汽的饱和压力  $p_s$  之比称为湿气体的相对湿度,即

$$\varphi = p_v / p_s \quad (2-3)$$

由于  $p_v$  随温度升高而增加,故当  $p_v$  一定时,相对湿度  $\varphi$  随温度升高而减小。

将式(2-3)代入式(2-1),得

$$H = \frac{M_v}{M_d} \frac{\varphi p_s}{P - \varphi p_s} \quad (2-4)$$

当气体中的可凝蒸汽达到饱和时,  $\varphi = 1$ , 此时的饱和湿度为

$$H_s = \frac{M_v}{M_d} \frac{p_s}{P - p_s} \quad (2-5)$$

此式表明,当干气体与可凝蒸汽的组分一定时,饱和湿度为总压和温度的函数,且随总压的增加而减小;随温度升高而增大。

湿气体的湿度与其同温度下的饱和湿度之比称为饱和度和,即



J. H. : Chemical Engineers' Handbook, 6th ed. , McGraw-Hill, New York (1984) 和化学工学协会编“化学工学便览”(改订四版)丸善株式会社(1978)等手册查取;“Hydrocarbon Processing”、“物性定数”等刊物也收录了有关露点与饱和蒸汽压的数据。

对于含有水蒸汽的湿空气,可分别用如下三个经验公式求取露点与饱和水蒸汽压的关系

①Antone 公式<sup>[1]</sup>

$$\log p_s = 7.22684 - \frac{1750.286}{235 + t_s} \quad (2-15)$$

式中  $p_s$  的单位为 kPa;  $t_s$  的单位为℃。此式在 0~100℃之间的计算误差较小。

②Keenan 和 Keyes 经验式<sup>[2]</sup>

$$p_s = \frac{a}{\exp \left[ \frac{bx(c+dx+ex^3)}{(f-x)(1+gx)} \right]} \quad (2-16)$$

式中  $x=673.4-1.8t_s$ ;  
 $a=2.210 \times 10^4$ ;  $b=2.302585$ ;  $c=3.243781$ ;  
 $d=3.26014 \times 10^{-3}$ ;  $e=2.00658 \times 10^{-9}$ ;  
 $f=1.16509 \times 10^3$ ;  $g=1.21547 \times 10^{-3}$ ;  
 $p_s$  的单位为 kPa;  $t_s$  的单位为℃。

③在 100~200℃的温度范围内,可用下式求取露点

$$t_s = 31.52 p_s^{0.25} \quad (2-17)$$

式中  $p_s$  的单位为 kPa;  $t_s$  的单位为℃。

对于含有水蒸汽的湿空气,上述诸参数的数据列于表 2-2<sup>[3]</sup>。

表 2-2 干空气及饱和湿空气的性质 (总压 101.3kPa)

| 温度<br>$t$<br>(℃) | 干空气的性质                      |                | 饱和湿空气的性质     |                                          |                             |                              |
|------------------|-----------------------------|----------------|--------------|------------------------------------------|-----------------------------|------------------------------|
|                  | 比容                          | 焓              | 水蒸汽压         | 比容                                       | 焓                           | 湿度                           |
|                  | $v_d$<br>m <sup>3</sup> /kg | $I_d$<br>kJ/kg | $p_s$<br>kPa | $v_H$<br>m <sup>3</sup> /kg <sub>d</sub> | $I_s$<br>kJ/kg <sub>d</sub> | $H_s$<br>kgv/kg <sub>d</sub> |
| 0                | 0.7738                      | 0.00           | 0.6108       | 0.7786                                   | 9.431                       | 0.003772                     |
| 1                | 0.7767                      | 1.005          | 0.6568       | 0.7813                                   | 11.16                       | 0.004057                     |
| 2                | 0.7795                      | 2.011          | 0.7055       | 0.7850                                   | 12.93                       | 0.004361                     |
| 3                | 0.7823                      | 3.017          | 0.7575       | 0.7882                                   | 14.76                       | 0.004685                     |
| 4                | 0.7852                      | 4.022          | 0.8129       | 0.7915                                   | 16.64                       | 0.005031                     |
| 5                | 0.7880                      | 5.027          | 0.8719       | 0.7948                                   | 18.57                       | 0.005399                     |
| 6                | 0.7908                      | 6.032          | 0.9346       | 0.7982                                   | 20.57                       | 0.005791                     |
| 7                | 0.7937                      | 7.041          | 1.001        | 0.8016                                   | 22.63                       | 0.006208                     |
| 8                | 0.7965                      | 8.046          | 1.072        | 0.8050                                   | 24.77                       | 0.006652                     |
| 9                | 0.7993                      | 9.050          | 1.146        | 0.8085                                   | 26.97                       | 0.007124                     |
| 10               | 0.8021                      | 10.06          | 1.227        | 0.8120                                   | 29.25                       | 0.007625                     |
| 11               | 0.8050                      | 11.06          | 1.312        | 0.8155                                   | 31.62                       | 0.008159                     |
| 12               | 0.8078                      | 12.07          | 1.402        | 0.8192                                   | 34.07                       | 0.008725                     |
| 13               | 0.8106                      | 13.07          | 1.497        | 0.8228                                   | 36.60                       | 0.009326                     |

续表

| 温度<br>$t$<br>(℃) | 干空气的性质                      |                | 饱和湿空气的性质     |                                          |                             |                              |
|------------------|-----------------------------|----------------|--------------|------------------------------------------|-----------------------------|------------------------------|
|                  | 比容                          | 焓              | 水蒸汽压         | 比容                                       | 焓                           | 湿度                           |
|                  | $v_d$<br>m <sup>3</sup> /kg | $I_d$<br>kJ/kg | $p_s$<br>kPa | $v_H$<br>m <sup>3</sup> /kg <sub>d</sub> | $I_s$<br>kJ/kg <sub>d</sub> | $H_s$<br>kgv/kg <sub>d</sub> |
| 14               | 0.8135                      | 14.08          | 1.597        | 0.8265                                   | 39.24                       | 0.009964                     |
| 15               | 0.8163                      | 15.09          | 1.704        | 0.8303                                   | 41.99                       | 0.01064                      |
| 16               | 0.8191                      | 16.09          | 1.817        | 0.8341                                   | 44.79                       | 0.01136                      |
| 17               | 0.8220                      | 17.10          | 1.937        | 0.8380                                   | 47.76                       | 0.01212                      |
| 18               | 0.8248                      | 18.10          | 2.063        | 0.8420                                   | 50.82                       | 0.01293                      |
| 19               | 0.8276                      | 19.11          | 2.196        | 0.8460                                   | 54.04                       | 0.01378                      |
| 20               | 0.8305                      | 20.11          | 2.337        | 0.8501                                   | 57.35                       | 0.01469                      |
| 21               | 0.8333                      | 21.12          | 2.486        | 0.8543                                   | 60.82                       | 0.01564                      |
| 22               | 0.8361                      | 22.13          | 2.643        | 0.8585                                   | 64.42                       | 0.01666                      |
| 23               | 0.8390                      | 23.13          | 2.808        | 0.8629                                   | 68.19                       | 0.01777                      |
| 24               | 0.8418                      | 24.14          | 2.983        | 0.8673                                   | 72.12                       | 0.01887                      |
| 25               | 0.8446                      | 25.15          | 3.167        | 0.8719                                   | 76.23                       | 0.02007                      |
| 26               | 0.8475                      | 26.15          | 3.360        | 0.8766                                   | 80.37                       | 0.02134                      |
| 27               | 0.8503                      | 27.16          | 3.565        | 0.8813                                   | 84.98                       | 0.02268                      |
| 28               | 0.8531                      | 28.16          | 3.779        | 0.8862                                   | 89.62                       | 0.02410                      |
| 29               | 0.8560                      | 29.17          | 4.005        | 0.8912                                   | 94.52                       | 0.02560                      |
| 30               | 0.8588                      | 30.18          | 4.243        | 0.8963                                   | 99.63                       | 0.02718                      |
| 31               | 0.8616                      | 31.18          | 4.492        | 0.9016                                   | 105.0                       | 0.02886                      |
| 32               | 0.8645                      | 32.19          | 4.755        | 0.9070                                   | 110.6                       | 0.03063                      |
| 33               | 0.8673                      | 33.20          | 5.030        | 0.9126                                   | 116.4                       | 0.03249                      |
| 34               | 0.8701                      | 34.20          | 5.319        | 0.9183                                   | 122.5                       | 0.03447                      |
| 35               | 0.8730                      | 35.21          | 5.623        | 0.9229                                   | 128.9                       | 0.03655                      |
| 36               | 0.8758                      | 36.22          | 5.942        | 0.9323                                   | 135.6                       | 0.03875                      |
| 37               | 0.8786                      | 37.22          | 6.276        | 0.9367                                   | 142.7                       | 0.04107                      |
| 38               | 0.8815                      | 38.23          | 6.626        | 0.9431                                   | 150.0                       | 0.04352                      |
| 39               | 0.8843                      | 39.24          | 6.993        | 0.9499                                   | 157.8                       | 0.04611                      |
| 40               | 0.8871                      | 40.24          | 7.377        | 0.9568                                   | 165.9                       | 0.04884                      |
| 41               | 0.8900                      | 41.25          | 7.779        | 0.9640                                   | 174.4                       | 0.05173                      |
| 42               | 0.8928                      | 42.25          | 8.201        | 0.9714                                   | 183.4                       | 0.05478                      |
| 43               | 0.8956                      | 43.28          | 8.641        | 0.9792                                   | 192.8                       | 0.05800                      |
| 44               | 0.8985                      | 44.29          | 9.102        | 0.9872                                   | 202.7                       | 0.06140                      |
| 45               | 0.9013                      | 45.29          | 9.584        | 0.9955                                   | 213.1                       | 0.06499                      |
| 46               | 0.9041                      | 46.30          | 10.09        | 1.004                                    | 224.0                       | 0.06878                      |
| 47               | 0.9070                      | 47.30          | 10.62        | 1.013                                    | 235.6                       | 0.07297                      |
| 48               | 0.9098                      | 48.31          | 11.16        | 1.022                                    | 247.6                       | 0.07703                      |
| 49               | 0.9126                      | 49.31          | 11.74        | 1.032                                    | 260.4                       | 0.08151                      |
| 50               | 0.9155                      | 50.32          | 12.34        | 1.042                                    | 273.9                       | 0.08625                      |
| 51               | 0.9184                      | 51.32          | 12.96        | 1.053                                    | 288.0                       | 0.09126                      |
| 52               | 0.9211                      | 52.33          | 13.62        | 1.064                                    | 302.9                       | 0.09657                      |
| 53               | 0.9240                      | 53.33          | 14.30        | 1.076                                    | 318.7                       | 0.1022                       |
| 54               | 0.9268                      | 54.33          | 15.01        | 1.088                                    | 335.4                       | 0.1081                       |
| 55               | 0.9296                      | 55.34          | 15.74        | 1.101                                    | 353.0                       | 0.1144                       |
| 56               | 0.9325                      | 56.34          | 16.51        | 1.114                                    | 371.6                       | 0.1211                       |
| 57               | 0.9353                      | 57.35          | 17.32        | 1.128                                    | 391.3                       | 0.1282                       |
| 58               | 0.9381                      | 58.35          | 18.15        | 1.143                                    | 412.2                       | 0.1358                       |
| 59               | 0.9410                      | 59.38          | 19.02        | 1.158                                    | 434.3                       | 0.1438                       |

续表

| 温度<br>$t$<br>( $^{\circ}\text{C}$ ) | 干空气的性质                          |                         | 饱和湿空气的性质              |                                   |                           |                            |
|-------------------------------------|---------------------------------|-------------------------|-----------------------|-----------------------------------|---------------------------|----------------------------|
|                                     | 比容                              | 焓                       | 水蒸汽压                  | 比容                                | 焓                         | 湿度                         |
|                                     | $v_d$<br>$\text{m}^3/\text{kg}$ | $I_d$<br>$\text{kJ/kg}$ | $p_s$<br>$\text{kPa}$ | $v_H$<br>$\text{m}^3/\text{kg}_d$ | $I_s$<br>$\text{kJ/kg}_d$ | $H_s$<br>$\text{kgv/kg}_d$ |
| 60                                  | 0.9438                          | 60.40                   | 19.92                 | 1.175                             | 457.8                     | 0.1523                     |
| 61                                  | 0.9466                          | 61.41                   | 20.86                 | 1.192                             | 482.7                     | 0.1613                     |
| 62                                  | 0.9495                          | 62.41                   | 21.84                 | 1.210                             | 509.4                     | 0.1709                     |
| 63                                  | 0.9523                          | 63.42                   | 22.86                 | 1.230                             | 537.5                     | 0.1812                     |
| 64                                  | 0.9551                          | 64.42                   | 23.92                 | 1.250                             | 567.6                     | 0.1922                     |
| 65                                  | 0.9580                          | 65.43                   | 25.01                 | 1.272                             | 599.4                     | 0.2039                     |
| 66                                  | 0.9608                          | 66.43                   | 26.15                 | 1.295                             | 633.8                     | 0.2164                     |
| 67                                  | 0.9636                          | 67.44                   | 27.34                 | 1.320                             | 670.6                     | 0.2208                     |
| 68                                  | 0.9665                          | 68.44                   | 28.57                 | 1.346                             | 709.5                     | 0.2442                     |
| 69                                  | 0.9693                          | 69.45                   | 29.84                 | 1.374                             | 751.8                     | 0.2597                     |
| 70                                  | 0.9721                          | 70.48                   | 31.17                 | 1.404                             | 797.0                     | 0.2763                     |
| 71                                  | 0.9750                          | 71.50                   | 32.56                 | 1.436                             | 845.6                     | 0.2943                     |
| 72                                  | 0.9778                          | 72.50                   | 33.96                 | 1.471                             | 898.3                     | 0.3136                     |
| 73                                  | 0.9806                          | 73.51                   | 35.44                 | 1.508                             | 954.8                     | 0.3346                     |
| 74                                  | 0.9835                          | 74.51                   | 36.97                 | 1.548                             | 1016.4                    | 0.3573                     |
| 75                                  | 0.9863                          | 75.52                   | 38.55                 | 1.592                             | 1083.3                    | 0.3820                     |
| 76                                  | 0.9891                          | 76.52                   | 40.20                 | 1.640                             | 1156.6                    | 0.4090                     |
| 77                                  | 0.9920                          | 77.52                   | 41.90                 | 1.691                             | 1236.1                    | 0.4385                     |
| 78                                  | 0.9948                          | 78.53                   | 43.66                 | 1.748                             | 1327.8                    | 0.4709                     |
| 79                                  | 0.9976                          | 79.53                   | 45.48                 | 1.810                             | 1419.9                    | 0.5066                     |
| 80                                  | 1.0004                          | 80.56                   | 47.37                 | 1.879                             | 1526.2                    | 0.5460                     |
| 81                                  | 1.003                           | 81.58                   | 49.32                 | 1.955                             | 1644.3                    | 0.5898                     |
| 82                                  | 1.006                           | 82.58                   | 51.33                 | 2.040                             | 1776.1                    | 0.6387                     |
| 83                                  | 1.009                           | 83.59                   | 53.42                 | 2.134                             | 1923.9                    | 0.6936                     |
| 84                                  | 1.012                           | 84.60                   | 55.58                 | 2.241                             | 2090.9                    | 0.7557                     |
| 85                                  | 1.015                           | 85.60                   | 57.81                 | 2.362                             | 2281.0                    | 0.8263                     |
| 86                                  | 1.017                           | 86.61                   | 60.11                 | 2.502                             | 2499.0                    | 0.9072                     |
| 87                                  | 1.020                           | 87.61                   | 62.49                 | 2.662                             | 2751.0                    | 1.001                      |
| 88                                  | 1.023                           | 88.62                   | 64.95                 | 2.850                             | 3046.2                    | 1.111                      |
| 89                                  | 1.026                           | 89.62                   | 67.49                 | 3.073                             | 3395.7                    | 1.241                      |
| 90                                  | 1.029                           | 90.63                   | 70.11                 | 3.340                             | 3816.0                    | 1.397                      |
| 91                                  | 1.032                           | 91.63                   | 72.82                 | 3.667                             | 4332.5                    | 1.589                      |
| 92                                  | 1.034                           | 92.64                   | 75.61                 | 4.076                             | 4977.2                    | 1.829                      |
| 93                                  | 1.037                           | 93.64                   | 78.49                 | 4.603                             | 5806.0                    | 2.138                      |
| 94                                  | 1.040                           | 94.65                   | 81.47                 | 5.306                             | 6915.3                    | 2.551                      |
| 95                                  | 1.043                           | 95.65                   | 84.53                 | 6.291                             | 8468.3                    | 3.130                      |
| 96                                  | 1.046                           | 96.66                   | 87.69                 | 7.770                             | 10804                     | 3.999                      |
| 97                                  | 1.049                           | 97.66                   | 90.95                 | 10.24                             | 14697                     | 5.449                      |
| 98                                  | 1.051                           | 98.67                   | 94.31                 | 15.17                             | 22491                     | 8.352                      |
| 99                                  | 1.054                           | 99.67                   | 97.76                 | 29.98                             | 45879                     | 17.057                     |
| 100                                 | 1.057                           | 100.67                  | 101.33                | —                                 | —                         | —                          |

## 2.1.2 绝热饱和温度与湿球温度

### (1) 绝热饱和温度

如图 2-1 所示的绝热饱和器, 假定含有水蒸汽的不饱和空气 (温度为  $t_b$ 、湿度为  $H$ ), 连续地通入器内与大

量喷洒的水接触, 水用泵循环, 认为水温是完全均匀的。因饱和器处于绝热, 故水汽化所需的潜热只能取自空气中的显热, 使空气增湿而降温, 但湿空气的焓是不变的。当空气被水所饱和之后, 气温就不再下降而等于循环水的温度, 此温度称为空气的绝热饱和温度  $t_{as}$ , 对应的饱和湿度为  $H_{as}$ 。

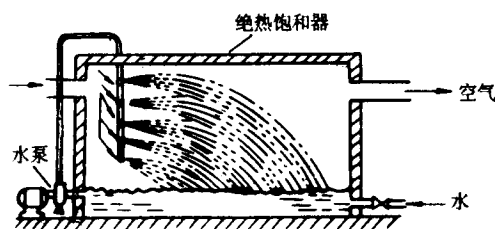


图 2-1 绝热饱和器

对于其他气体与液体接触的体系, 按上述方法同样可以得其绝热饱和温度。在绝热饱和过程中, 由于湿气体的焓保持不变, 故进入绝热饱和器时的焓  $I$  等于经绝热增湿而降温至  $t_{as}$  时的焓  $I_{as}$ 。根据式 (2-13), 可以得出

$$\begin{aligned} I_{as} &= I = (C_d + C_v H) t_b + r_0 H \\ &= (C_d + C_v H_{as}) t_{as} + r_0 H_{as} \end{aligned} \quad (2-18)$$

在温度不太高时,  $H$  与  $H_{as}$  一般均甚小, 且忽略  $C_d$  与  $C_v$  随温度的变化, 则可近似取

$$C_d + C_v H \approx C_d + C_v H_{as} \approx C_H$$

于是, 由式 (2-18) 可得

$$t_{as} = t_b - \frac{r_0}{C_H} (H_{as} - H) \quad (2-19)$$

式 (2-19) 称为绝热饱和方程。由于  $H_{as}$  取决于  $t_{as}$ , 故当干气体的组成和总压一定时, 气体的绝热饱和温度为气体温度和湿度两个变量的函数。

### (2) 湿球温度

如图 2-2 所示的两支温度计, 左边一支温度计的感温球露在空气中, 称为干球温度计, 所测的温度为空气本身温度, 称为干球温度。另一支温度计的感温球用纱布包裹, 纱布下部浸入在水中使之保持润湿, 称为湿球温度计, 它在空气中达到稳定时的温度称为空气的湿球温度。

湿球温度并不代表空气的真实温度, 而是当空气至水的传热速率恰好等于水表面汽化向空气传递潜热速率时的温度, 故湿球温度是表示空气状态或性质的一种参数。对于其它气体与可凝蒸汽组成的湿气体, 同样存在着它的湿球温度。

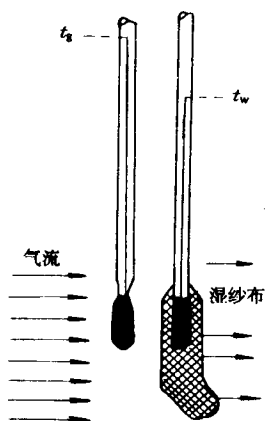


图 2-2 干湿球温度计

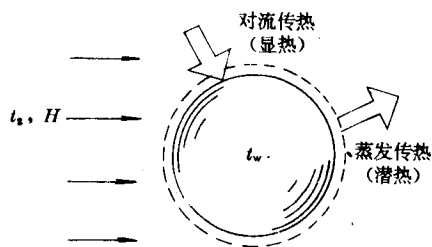


图 2-3 气体与液滴接触时的传热与传质

气体与液滴接触时的传热与传质（液体汽化）的关系可用图 2-3 来表示，其传热与传质速率可分别表示为

$$q = \alpha (t_g - t_w) \quad (2-20)$$

$$N = k_H (H_w - H) \quad (2-21)$$

式中  $q$  ——由气体传给液滴的热量,  $\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ;

$\alpha$  ——对流传热膜系数,  $\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{K})$ ;

$t_w$  ——湿球温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$N$  ——液体汽化的传质速率,  $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ;

$k_H$  ——以湿度差为推动力的传质系数,  $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ;

$H_w$  ——在  $t_w$  时的饱和湿度。

当两者的传递速率相等时 ( $q = Nr_w$ )，由式 (2-20) 和式 (2-21) 可得

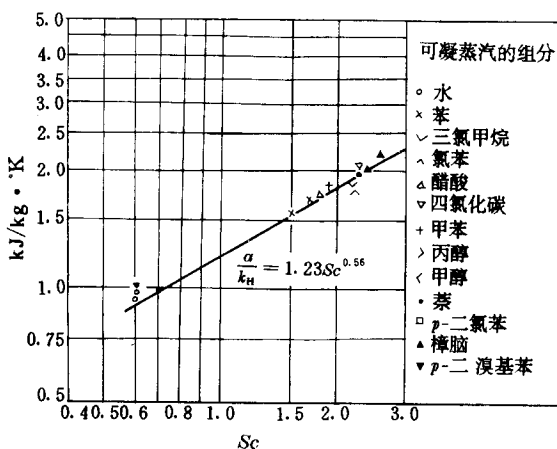
$$t_w = t_g - \frac{k_H r_w}{\alpha} (H_w - H) \quad (2-22)$$

式中  $r_w$  ——在湿球温度下液体的汽化潜热,  $\text{kJ}/\text{kg}$ 。

此式称为湿球温度方程，当干气体的组成和总压一

定时，湿球温度为干球温度和湿度的函数。在气体与液体直接接触的增湿、减湿及水冷却过程中，是液体被加热或被冷却的极限温度。

由湿球温度方程求取湿球温度时，除给定湿气体的状态 ( $t_g, H$ ) 外，还需要已知  $\alpha/k_H$  值。Bedingfield 和 Drew<sup>[4]</sup> 用空气与不同液体进行试验，在流体处于湍流流动的条件下，测得  $\alpha/k_H$  之比的实验值示于图 2-4。

图 2-4 空气与不同组分可凝蒸汽的  $\alpha/k_H$  实测值

当干气体为空气之外的其他气体时，传热膜系数与传质系数的比值为如下的关系<sup>[5]</sup>

$$\frac{\alpha}{k_H} = C_H \left( \frac{Sc}{Pr} \right)^{2/3} \quad (2-23)$$

式中  $Sc (= \mu/\rho D_v)$  ——施米特数；

$Pr (= C_p \mu/\lambda)$  ——普朗德数。

式 (2-23) 只能用湿度较低的情况；当湿度较高时，传热膜系数与传质系数 (或其比值) 需要实测而得到。文献 [6] 汇集了几种湿空气体系的传热膜系数与传质系数之比的实测数据，列于表 2-3。

从表中数据看出，不同的气液体系，其  $\alpha/k_H$  比值是不同的。对于含水蒸汽的湿空气， $\alpha/k_H = 1.09 \sim 1.21$ ，此值近似等于湿比热，即

$$\frac{\alpha}{k_H} \approx C_H \quad (2-24)$$

在温度不太高，相对湿度不太低的情况下，可近似取  $r_w \approx r_0$ 、 $H_w \approx H_{ws}$ ，则含水蒸汽的湿空气，其湿球温度在数值上近似等于绝热饱和温度，从而可用绝热饱和方程式 (2-19) 求取湿球温度。在较高温度下 ( $t_g > 100^{\circ}\text{C}$ ) 的含水蒸汽湿空气以及其他气液体系，其湿球温度均高于绝热饱和温度。

湿球温度时的焓  $I_w$  与绝热饱和时的焓  $I_{as}$  之间有如下关系<sup>[7]</sup>

表 2-3 空气与有机液体体系的  $\alpha/k_H$  实测值

| 液体种类  | $\alpha/k_H$ |           |           |           | 资料来源                    |
|-------|--------------|-----------|-----------|-----------|-------------------------|
|       | 资料<br>(1)    | 资料<br>(2) | 资料<br>(3) | 资料<br>(4) |                         |
| 苯     | 1.72         | 1.67      |           | 1.84      | (1) Mark, Trans. Am.    |
| 四氯化碳  | 1.84         | 2.09      |           | 1.97      | Inst. Chem. Engrs., 28, |
| 氯苯    | 1.84         |           |           |           | 107(1932).              |
| 醋酸乙酯  | 1.76         |           |           | 1.93      | (2) Sherwood, Conings,  |
| 二氯乙烯  | 2.09         |           |           |           | Trans. Am. Inst. Chem.  |
| 丙酸乙酯  |              |           | 2.09      |           | Engrs., 28, 88(1932).   |
| 甲醇    |              |           | 1.47      |           | (3) Arnold, Physics, 4, |
| 乙醇    |              |           |           | 1.72      | 225, 344(1933).         |
| 醋酸正戊酯 |              | 2.18      | 1.80      |           | (4) 水科笃郎、中岛正            |
| 甲苯    | 1.84         | 2.09      | 2.09      | 2.01      | 基, 化学机械, 15, 30         |
| 二甲苯   |              |           |           | 2.30      | (1951)                  |
| 水     | 1.09         | 1.21      | 1.13      | 1.09      |                         |

$$I_w - I_{as} = C_L t_w (H_w - H) \tag{2-25}$$

式中  $C_L$ ——液体的比热容,  $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

在  $\alpha/k_H$  值未知的情况下, 可以由此式计算湿球温度, 这种计算要用试差法。

湿气体的湿球温度可以用如图 2-2 所示的干、湿球温度计测定, 测量时的气流速度应在  $5\text{m/s}$  以上, 才能使其传热过程保持以对流为主, 减少辐射与传导传热的影响。用干、湿球温度计测得的含水蒸汽的空气干球与湿球温度, 并由此计算出的相对湿度数据列于表 2-4<sup>[8]</sup>。

2.1.3 湿度的测定方法<sup>[5]</sup>

(1) 露点法 这是测量气体湿度的一种最基本的方法, 通过直接观察湿气体在光滑表面上冷却时的露点而得其湿度。这种测量方法比较简便, 但因冷却表面温度的测量不易准确, 以及气体与冷却表面之间有温度梯度, 从而产生测量误差。为提高测量的可靠性, 通常是测量气体冷却时开始生成雾滴与加热时开始消失雾滴两种情况下的温度, 再取两个温度的平均值作为露点。

(2) 湿球温度法 此法是用干、湿球温度计来测量气体的湿度, 前面已作了介绍, 它的使用最为广泛, 但同样存在着露点法所产生的误差。

(3) 物理测湿法 此法是根据某些物质(如头发、木质纤维、塑料等)随湿度的不同而发生尺寸变化的特性, 制做成物理测湿计, 用以测量气体的湿度。

(4) 电测湿法 此法是根据湿度对某些物质电阻的影响来进行测量的。采用具有吸湿性物质的薄膜与湿气体接触, 通过测量该薄膜随湿度而发生电阻的变化, 即可确定气体的湿度。

(5) 重量法 此法是将一定量的湿气体与一种吸湿性化学物质充分接触, 如用五氧化二磷吸收气体中的水蒸汽, 通过称量吸湿后物质的增重, 来确定气体的湿度。此法测量的范围较宽, 而且也是一种最精确地测量湿度的方法。

例 2-1 已知含水蒸汽的湿空气总压为  $100\text{kPa}$ , 温度为  $25^\circ\text{C}$ , 相对湿度为  $70\%$ , 试计算空气的湿球温度。

表 2-4 常压下 ( $101.3\text{kPa}$ ) 湿空气中水蒸汽的相对湿度 (%) 与干、湿球温度的关系

| 湿球<br>温度<br>℃ | 干 球 温 度—湿 球 温 度,℃ |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |      |      |      |      |      |      |      |
|---------------|-------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|
|               | 0.0               | 1.0 | 2.0 | 3.0 | 4.0 | 5.0 | 6.0 | 7.0 | 8.0 | 9.0 | 10.0 | 11.0 | 12.0 | 13.0 | 14.0 | 15.0 | 16.0 | 17.0 |
| 0             | 100               | 83  | 67  | 54  | 42  | 31  | 22  | 14  | 7   | 1   |      |      |      |      |      |      |      |      |
| 2             | 100               | 84  | 70  | 58  | 47  | 37  | 28  | 21  | 14  | 8   | 2    |      |      |      |      |      |      |      |
| 4             | 100               | 86  | 73  | 61  | 51  | 42  | 33  | 26  | 20  | 14  | 9    | 4    |      |      |      |      |      |      |
| 6             | 100               | 87  | 75  | 64  | 54  | 46  | 38  | 31  | 25  | 19  | 15   | 10   | 6    | 3    |      |      |      |      |
| 8             | 100               | 88  | 76  | 66  | 57  | 49  | 42  | 35  | 29  | 24  | 19   | 15   | 11   | 8    | 5    | 2    |      |      |
| 10            | 100               | 88  | 78  | 69  | 60  | 52  | 45  | 39  | 33  | 28  | 24   | 20   | 16   | 13   | 10   | 7    | 5    | 2    |
| 12            | 100               | 89  | 79  | 70  | 62  | 55  | 48  | 42  | 37  | 32  | 28   | 24   | 20   | 17   | 14   | 11   | 9    | 7    |
| 14            | 100               | 90  | 81  | 72  | 64  | 57  | 51  | 45  | 40  | 35  | 31   | 27   | 24   | 20   | 17   | 15   | 12   | 10   |
| 16            | 100               | 90  | 82  | 74  | 66  | 60  | 54  | 48  | 43  | 38  | 34   | 30   | 27   | 24   | 21   | 18   | 16   | 13   |
| 18            | 100               | 91  | 83  | 75  | 68  | 62  | 56  | 50  | 45  | 41  | 37   | 33   | 30   | 27   | 24   | 21   | 19   | 16   |
| 20            | 100               | 91  | 83  | 76  | 69  | 63  | 58  | 52  | 48  | 43  | 39   | 36   | 32   | 29   | 26   | 24   | 21   | 19   |
| 22            | 100               | 92  | 84  | 77  | 71  | 65  | 59  | 54  | 50  | 45  | 41   | 38   | 35   | 31   | 29   | 26   | 24   | 21   |
| 24            | 100               | 92  | 85  | 78  | 72  | 66  | 61  | 56  | 51  | 47  | 43   | 40   | 37   | 34   | 31   | 28   | 26   | 24   |
| 26            | 100               | 92  | 85  | 79  | 73  | 67  | 62  | 57  | 53  | 49  | 45   | 42   | 39   | 36   | 33   | 30   | 28   | 26   |
| 28            | 100               | 93  | 86  | 80  | 74  | 68  | 63  | 59  | 55  | 51  | 47   | 43   | 40   | 37   | 35   | 32   | 30   | 28   |
| 30            | 100               | 93  | 86  | 80  | 75  | 69  | 65  | 60  | 56  | 52  | 48   | 45   | 42   | 39   | 36   | 34   | 31   | 29   |
| 32            | 100               | 93  | 87  | 81  | 76  | 70  | 66  | 61  | 57  | 53  | 50   | 46   | 43   | 41   | 38   | 35   | 33   | 31   |
| 34            | 100               | 93  | 87  | 82  | 76  | 71  | 67  | 62  | 58  | 55  | 51   | 48   | 45   | 42   | 39   | 37   | 34   | 32   |

解: 在本例条件下, 湿球温度近似等于绝热饱和温度, 故可用式 (2-19) 计算。由于绝热饱和温度  $t_{as}$  与其饱和湿度  $H_{as}$  之间的函数关系较复杂, 故一般采用试差法求解。

现设  $t_{as}=21^{\circ}\text{C}$ , 从表 2-2 查得  $p_s=2.486\text{kPa}$ , 则饱和湿度为

$$H_{as}=0.622 \frac{2.486}{100-2.486}=0.01586\text{kg}_v/\text{kg}_d$$

再查得  $25^{\circ}\text{C}$  时的饱和蒸汽压  $p_s=3.167\text{kPa}$ , 其湿度为

$$H=0.622 \frac{0.7 \times 3.167}{100-0.7 \times 3.167}=0.0141\text{kg}_v/\text{kg}_d$$

由式 (2-11) 计算空气的湿比热

$$C_H=1.01+1.88 \times 0.0141=1.037\text{kJ}/(\text{kg}_d \cdot \text{K})$$

将上列数据代入式 (2-19) 计算绝热饱和温度:

$$t_{as}=25-\frac{2500}{1.037}(0.01586-0.0141)=20.8^{\circ}\text{C}$$

由于计算出的  $t_{as}$  值与假设值近似相等, 故湿球温度为  $20.8^{\circ}\text{C}$ 。否则, 需重新假设  $t_{as}$  值, 重复上述计算。

## 2.2 湿气体的湿度图及其应用

在增湿、减湿及水冷却过程的计算中, 往常要用到上述湿气体的诸参数, 为计算之方便, 可将这些参数之间的关系绘成图线, 用以查取各项参数的数值, 这种算图通称为湿度图。

常用的湿度图有两种, 一种是采用以温度为横坐标, 以湿度为纵坐标所绘制的, 称为温-湿图 ( $t-H$  图); 另一种是采用以湿度为横坐标, 以焓为纵坐标所绘制的, 称为焓-湿图 ( $I-H$  图)<sup>①</sup>, 这两种湿度图又依气体组成或参数不同而有不同的形式。下面分别介绍各种湿度图及其用法。

### 2.2.1 湿空气的 $t-H$ 图<sup>[1]</sup>

含有水蒸汽的湿空气的  $t-H$  图示于图 2-5。图中任何一点都代表一定的湿空气状态。共有五条曲线, 即相对湿度线 (等  $\phi$  线)、绝热冷却线 (等  $I$  线)、比容线 (等  $v_H$  线)、湿比热线和汽化潜热线, 这些曲线都是由上列各式计算值作出的。运用  $t-H$  图查取湿空气的诸参数时, 只要

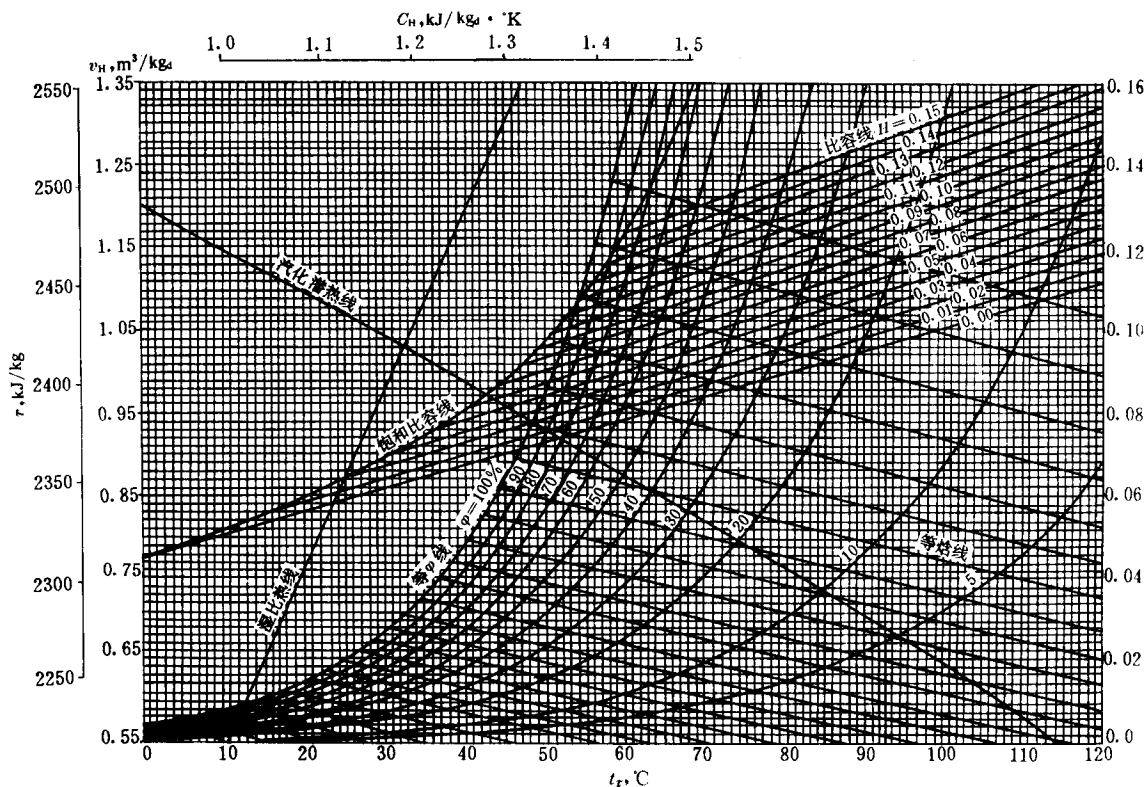


图 2-5 湿空气的  $t-H$  图 (基准:  $101.3\text{kPa}$ ,  $1\text{kg}$  干空气)

① 在某些资料中, 将焓-湿图称为  $I-x$  图,  $I$  代表焓,  $x$  代表湿度。

给定两个参数,就可以在图上查得其他参数值,具体使用方法参见例 2-2。

日本东京大学内田研究室<sup>[8]</sup>绘制的  $t$ - $H$  图示于图 2-6,图中各参数线的说明示于图 2-7。该图的使用方法与图 2-5 基本相同,它更适用于水冷却塔的计算。

**例 2-2** 已知含水蒸汽的湿空气干球温度为  $40^{\circ}\text{C}$ ,湿球温度为  $34^{\circ}\text{C}$ ;总压为  $101.3\text{kPa}$ ,由  $t$ - $H$  图查取相对湿度、湿度、露点、比容和湿比热。

解:首先在  $t$ - $H$  图上确定该湿空气的状态点,即在横

坐标上由  $t_w=34^{\circ}\text{C}$  的位置垂直向上至饱和湿度线上的  $O$  点,再从  $O$  点沿等  $I$  线与  $t_d=40^{\circ}\text{C}$  的垂线交于  $a$  点,此点为该湿空气的状态点(见图 2-8),然后再分别求取各参数:

①  $a$  点所处的相对湿度为  $70\%$ ;

② 由  $a$  点沿等湿线向右交于  $b$  点,得其湿度为  $H=0.034\text{kg}_v/\text{kg}_d$ ;

③ 由  $a$  点沿等湿线向右交于  $b$  点,得其湿度为  $H=0.034\text{kg}_v/\text{kg}_d$ ;

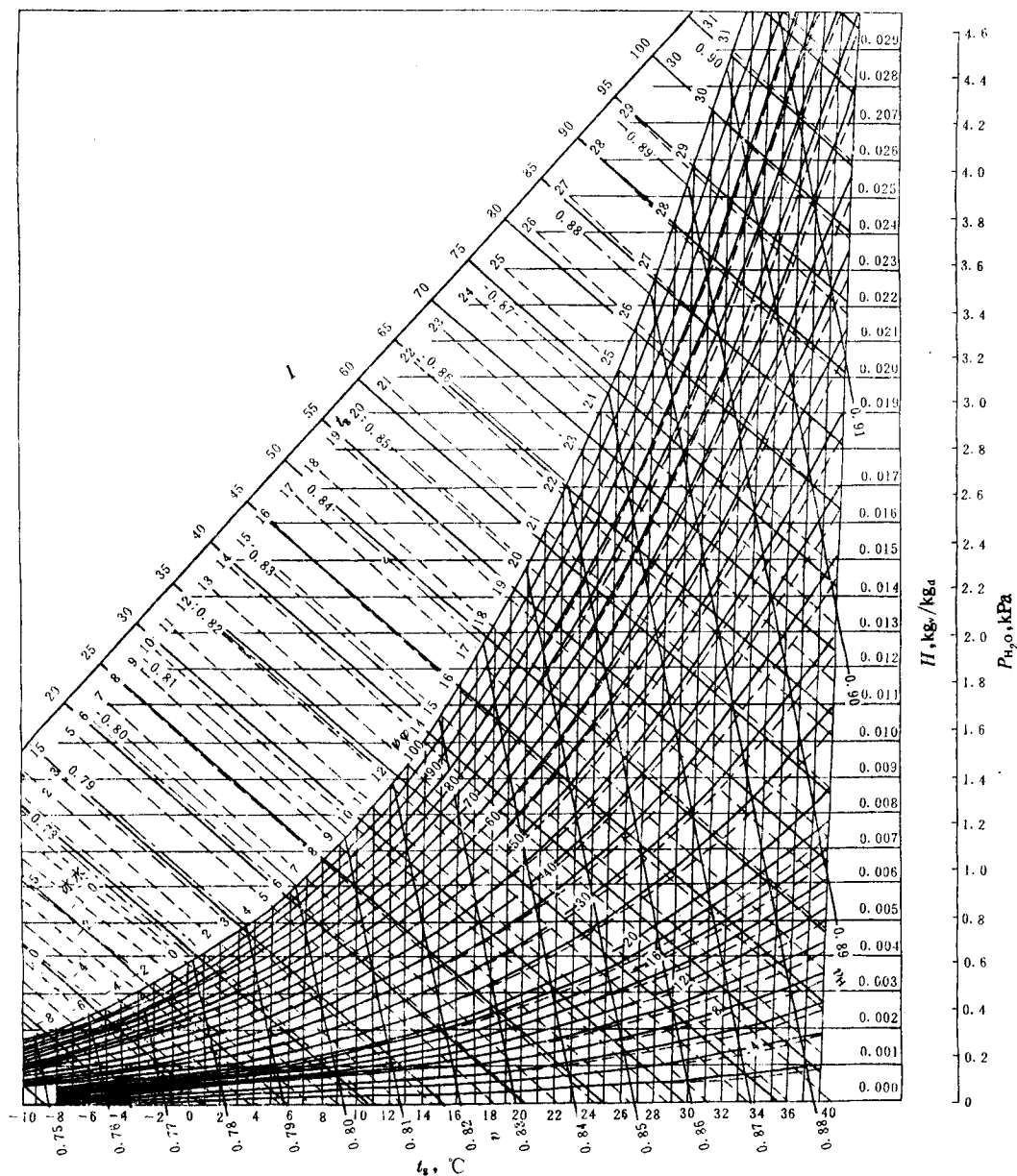


图 2-6 低温下湿空气的  $t$ - $H$  图 (基准:  $101.3\text{kPa}$ ,  $1\text{kg}$  干空气)

(使用说明见图 2-7)

③由  $a$  点沿等湿线向左交饱和湿度线于  $c$  点, 再垂直向下至横坐标, 得其露点为  $t_d = 32.5^\circ\text{C}$ ;

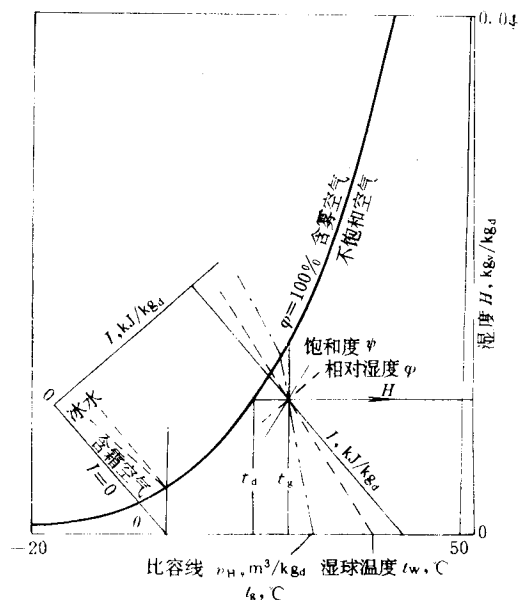


图 2-7 图 2-6 中各参数线的说明

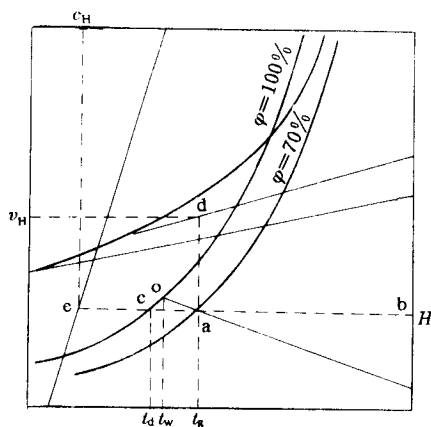


图 2-8 例 2-2 附图

④由  $a$  点作垂线交对应湿度的比容线于  $d$  点, 再平行向左至纵坐标, 得其湿比容为  $v_H = 0.93\text{m}^3/\text{kg}_d$ ;

⑤由  $a$  点沿等湿线向左交比容线于  $e$  点, 再从  $e$  点垂直向上即可得其湿比热容为  $C_H = 1.07\text{kJ}/(\text{kg}_d \cdot \text{K})$ 。

## 2.2.2 高温下湿气体的 $t$ - $H$ 图<sup>[1]</sup>

图 2-9 为高温下的湿度图, 该图除适用于含水蒸汽

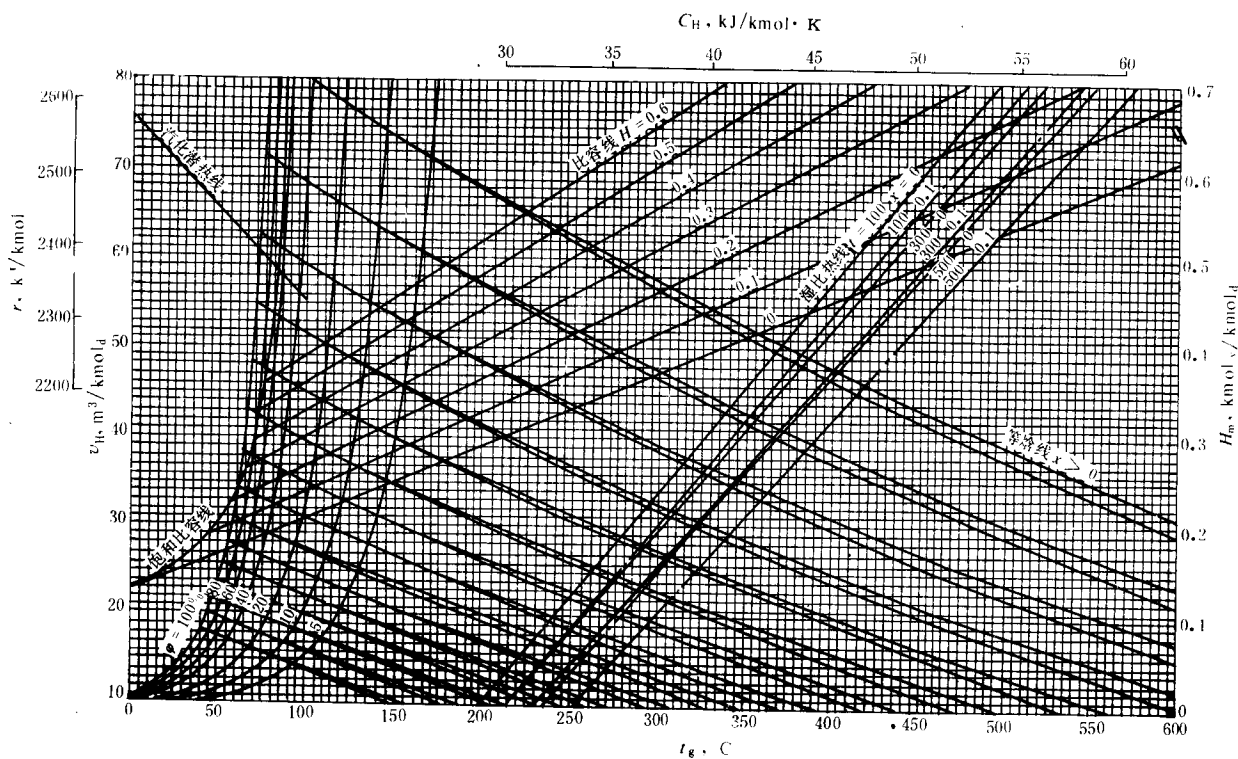


图 2-9 高温下湿气体的  $t$ - $H$  图  
(基准: 101.3kPa, 1kmol 干气体,  $x_{\text{CO}_2}$  的摩尔分率)

的湿空气外,还可用于查取高温燃烧后含水蒸汽的湿气体(如烟、炉气等)诸参数。由于这些燃烧后的气体中含有 $\text{CO}_2$ 和其它组分,干气体的分子量与空气不同,故该图采用 $1\text{kmol}$ 的干气为基准,总压仍为大气压力;又因 $\text{CO}_2$ 的比热容随温度的变化较大,故凡涉及热量变化的图线(绝热冷却线和湿比热线),均引入 $\text{CO}_2$ 含量对这些图线的影响。该图的查用方法与图2-5基本相同,但因使用范围(温度和气体组成)较广,故数据的准确性较图2-5差。图2-8的使用方法在例2-3中说明。

**例 2-3** 已知烟气总压为 $101.3\text{kPa}$ ,其中水蒸汽的分压为 $7.1\text{kPa}$ , $\text{CO}_2$ 的分压为 $8.1\text{kPa}$ ,其余组分可视为氮气;烟气的温度为 $300^\circ\text{C}$ 。试用高温湿度图求取该气体的比容和湿比热;如果将烟气的温度降至 $100^\circ\text{C}$ ,每千摩尔干气放出的热量为多少?

**解:**根据已知条件计算烟气中水蒸汽的摩尔湿度 $H_m$ 和 $\text{CO}_2$ 的摩尔分率 $x$

$$H_m = \frac{7.1}{101.3 - 7.1} = 0.0753 \text{ kmol}_v / \text{kmol}_d$$

$$x = \frac{8.1}{101.3 - 8.1} = 0.087 \text{ kmol}_{\text{CO}_2} / \text{kmol}_d$$

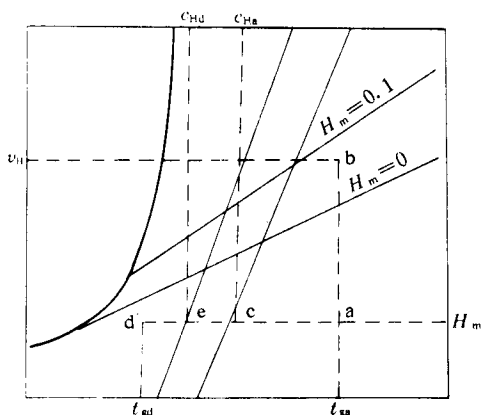


图 2-10 例 2-3 附图

由 $H_m$ 值和烟气温度得其状态 $a$ 点(见图2-10)。由 $a$ 点垂直向上交对应 $H_m$ 值的比容线于 $b$ 点,再向左至湿比容的坐标,得 $v_H = 50.5 \text{ m}^3 / \text{kmol}_d$ 。

由 $a$ 点沿等湿线向左与对应 $x$ 的湿比热线交于 $c$ 点,再垂直向上至湿比热的坐标,得 $C_{Hg} = 35.1 \text{ kJ} / (\text{kmol}_d \cdot ^\circ\text{C})$ 。

当烟气降温至 $100^\circ\text{C}$ 时,仍高于其露点,故其湿度不变,则由 $a$ 点沿等湿线向左交于温度为 $100^\circ\text{C}$ 时的 $d$ 点,此即为降温后的状态点。再由 $ad$ 线与对应 $x$ 值的湿比热线的交点 $e$ 垂直向上至湿比热的坐标,得 $C_{Hd} = 33.2 \text{ kJ} / (\text{kmol}_d \cdot ^\circ\text{C})$ 。于是,该烟气从 $300^\circ\text{C}$ 降至 $100^\circ\text{C}$ 时,每

$1\text{kmol}$ 干气放出的热量为

$$\Delta I = 35.1 \times 300 - 33.2 \times 100 = 7210 \text{ kJ/kmol}$$

### 2.2.3 湿空气的 $I-H$ 图<sup>[9]</sup>

图2-11为湿空气的焓-湿图( $I-H$ 图),图中纵坐标为焓值;但湿度是采用与纵坐标成 $135^\circ$ 角的斜角坐标轴,而横坐标上的湿度则是斜角坐标上的投影。采用斜角坐标的目的是为了避免线条密集而难以查取数据。 $I-H$ 图包括五种图线,即等焓线、等湿线、干球温度线、相对湿度线(等 $\phi$ 线)和水蒸汽分压线。 $I-H$ 图仅在制作方法上与 $t-H$ 图不同,它的用途和用法均与 $t-H$ 图无异。

此外,在Perry著的“Chemical Engineers' Handbook” 6th ed. (1984)一书中,也列有几种湿度图可供查用。

### 2.2.4 总压对湿气体性质的影响

上面列举的湿度图都是在大气压力下得出的,但若总压略偏于大气压力,仍可以使用这些湿度图。在工业上,工作压力往往与大气压力差别较大,这些湿度图将不能直接使用。但为了利用湿度图之方便,可以对压力进行校正后再查图求取湿气体的诸参数。

当总压 $P_T$ 不等于大气压力 $P_0$ 时,欲求取湿气体的湿度 $H_T$ ,可以先依据该湿气体的 $t_g$ 和 $t_w$ 在 $P_0$ 的 $t-H$ 图上,查得其湿度 $H$ ,然后再换算到 $P_T$ 时的 $H_T$ 。由于湿球温度方程中的 $k_H r_w / a$ 值几乎不受总压的影响,则在一定的 $t_g$ 和 $t_w$ 时,由湿球温度方可得

$$H_{wT} - H_T = H_w - H \quad (2-26)$$

在两种压力下的饱和湿度 $H_{wT}$ 和 $H_w$ 均满足式(2-5),由此可得

$$H_T - H = H_{wT} - H_w = \frac{M_v}{M_d} p_s \left( \frac{1}{P_T - p_s} - \frac{1}{P_0 - p_s} \right) \quad (2-27)$$

由湿度图查得 $H$ 值代入上式,即可算出 $P_T$ 压力下的湿度 $H_T$ 。

不同总压下水蒸汽的湿空气饱和湿度与温度的关系示于图2-12<sup>[1]</sup>;含水蒸汽的湿气体摩尔饱和湿度与温度的关系示于图2-13<sup>[1]</sup>。

当湿气体的温度和湿度一定时,欲求取总压为 $P_T$ 时的湿球温度 $t_{wT}$ ,可以先从大气压下的湿度图上查得 $t_w$ 和 $H_w$ ,然后按下式计算 $t_{wT}$ ,并计算出 $P_T$ 压力下的饱和湿度 $H_{wT}$

$$\frac{t_g - t_{wT}}{H_{wT} - H} = \frac{t_g - t_w}{H_w - H} \quad (2-28)$$

类似上述方法,亦可使用大气压力下的湿度图求取总压为 $P_T$ 时的其它参数。由于压力对湿比热和焓值的影响甚小,故这两个参数一般可以从湿度图直接查用。

**例 2-4** 已知含水蒸汽的湿空气干球温度为 $30^\circ\text{C}$ ,

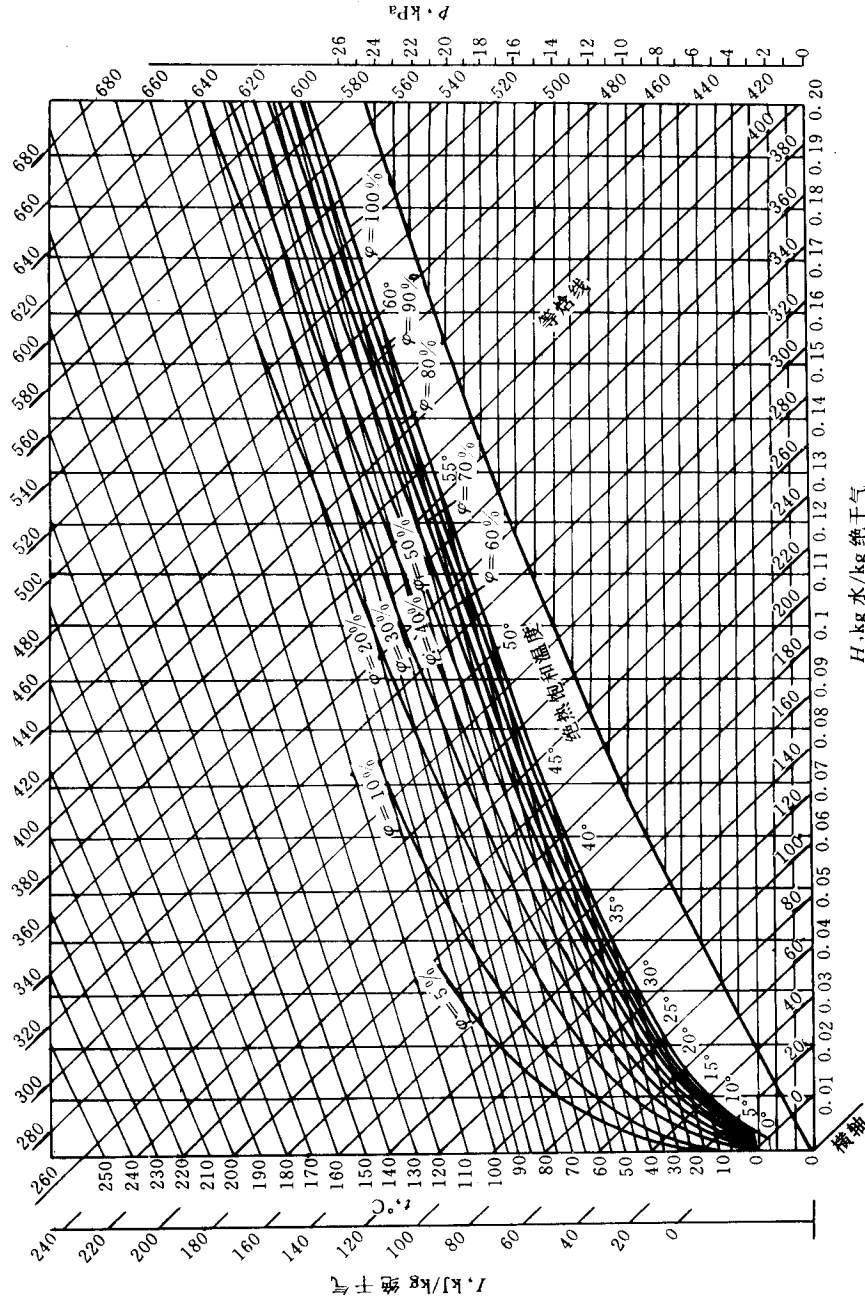


图 2-11 湿空气的  $I-H$  图(基准: 101.3kPa, 1kg 干空气)

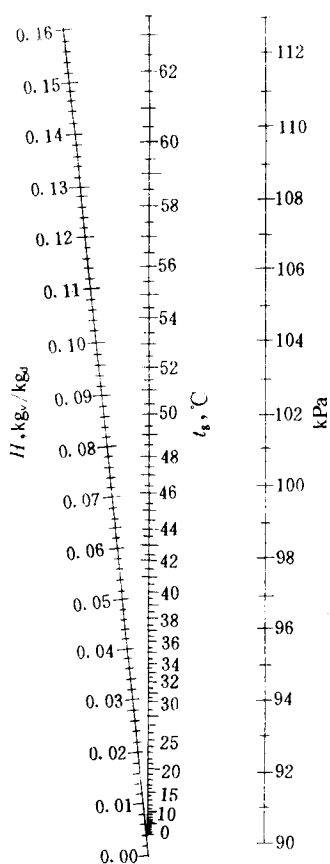


图 2-12 含水蒸汽的湿空气饱和湿度  
与温度和总压的关系

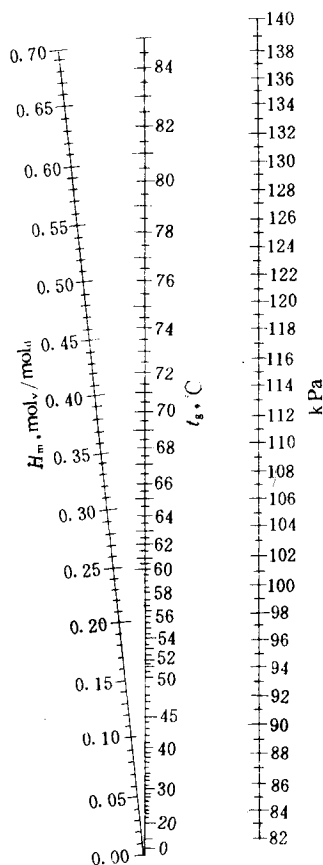


图 2-13 含水蒸汽的湿气体摩尔饱和湿度  
与温度和总压的关系

湿球温度为 20℃；总压为 93.2kPa。试用总压为 101.3kPa 的湿度图求取该气体的湿度  $H_T$ ，并求取饱和湿度  $H_{wT}$ 。

解：利用图 2-11 所示的  $I-H$  图求解，以绝热饱和温度作为湿球温度。在  $t_s=30^\circ\text{C}$  的等温线与  $t_{as}=20^\circ\text{C}$  的等焓线交点，查得湿度  $H=0.0108\text{kg}_v/\text{kg}_d$ ；再从该图查得 20℃时的饱和水蒸汽压  $P_s=2.34\text{kPa}$ 。

将查得的数据代入式 (2-27)，计算总压为 93.2kPa 下的湿度

$$\begin{aligned} H_T &= 0.0108 + 0.622 \\ &\times 2.34 \left( \frac{1}{93.2 - 2.34} - \frac{1}{101.3 - 2.34} \right) \\ &= 0.0121\text{kg}_v/\text{kg}_d \end{aligned}$$

饱和湿度由图 2-12 查取。当压力为 93.2kPa，温度为 30℃时，查得

$$H_{wT} = 0.030\text{kg}_v/\text{kg}_d$$

### 3 增湿与减湿过程的计算基础

#### 3.1 气体与液体间的传热与传质关系

在气体与液体直接接触的增湿与减湿过程中，气体与液体之间通常存在温度差，而且在气相主体与液相表面之间又存在湿含量差。因此，在气液相之间既有热量的传递，又有质量的传递，故这种过程的传递关系及其推动力与单纯的传热或传质过程是不同的。现分别讨论气液两相之间在增湿过程和减湿过程中的传热与传质关系。

##### 3.1.1 增湿过程中的传热与传质关系

在塔设备内，当未饱和的冷气体从塔底进入，与塔