



## 第12篇 湿度测定法，蒸发冷却， 致冷及深冷过程

---

作者：

|                  |         |
|------------------|---------|
| Eno Bagnoli      | 湿度测定法   |
| R. W. Norris     | 蒸发冷却及致冷 |
| T. M. Flynn      | 深冷过程    |
| K. T. Timmerhaus |         |

译者：

|     |                    |
|-----|--------------------|
| 徐敦顺 | 湿度测定法，蒸发冷却及致冷，深冷过程 |
| 林纪方 | 本篇审校人              |

136536/2212)

21449/0112

## 第12篇 目 录

|                                 |       |                     |       |
|---------------------------------|-------|---------------------|-------|
| 12.1 湿度测定法 .....                | 12-5  | 例15 .....           | 12-37 |
| 12.1.1 名词解释 .....               | 12-5  | 12.2.7 冷却池 .....    | 12-38 |
| 12.1.2 湿球温度同绝热饱和温度的<br>关系 ..... | 12-6  | 例16 .....           | 12-40 |
| 例1 .....                        | 12-6  | 12.3 致冷 .....       | 12-41 |
| 12.1.3 湿度表的应用 .....             | 12-7  | 12.3.1 导论 .....     | 12-41 |
| 一、用例题说明湿度图的应用 .....             | 12-7  | 一、基本原理 .....        | 12-41 |
| 例2 .....                        | 12-8  | 二、定义 .....          | 12-41 |
| 例3 .....                        | 12-18 | 12.3.2 致冷剂性质 .....  | 12-42 |
| 例4 .....                        | 12-18 | 一、沸点和压力 .....       | 12-42 |
| 例5 .....                        | 12-19 | 二、冷冻温度 .....        | 12-42 |
| 例6 .....                        | 12-19 | 三、临界温度和压力 .....     | 12-42 |
| 例7 .....                        | 12-20 | 四、冷凝器和蒸发器的压力 .....  | 12-42 |
| 二、非大气压条件下湿度图的应用 .....           | 12-20 | 五、比容 .....          | 12-42 |
| 三、相对湿度和露点 .....                 | 12-21 | 六、潜热 .....          | 12-42 |
| 例8 .....                        | 12-21 | 七、液体的比热 .....       | 12-43 |
| 12.1.4 湿度的测量 .....              | 12-22 | 八、分子量 .....         | 12-43 |
| 一、露点法 .....                     | 12-22 | 九、理论吨马力 .....       | 12-43 |
| 二、湿球法 .....                     | 12-22 | 十、排出温度 .....        | 12-43 |
| 三、机械湿度计 .....                   | 12-22 | 十一、相溶性 .....        | 12-43 |
| 12.2 蒸发冷却 .....                 | 12-23 | 十二、安全方面 .....       | 12-43 |
| 12.2.1 原理 .....                 | 12-23 | 十三、其他所希望的性质 .....   | 12-43 |
| 12.2.2 冷却塔理论 .....              | 12-23 | 12.3.3 设备的选择 .....  | 12-43 |
| 例9 .....                        | 12-25 | 12.3.4 蒸汽压缩循环 ..... | 12-46 |
| 例10 .....                       | 12-25 | 一、单级致冷循环 .....      | 12-46 |
| 12.2.3 机械通风塔 .....              | 12-26 | 二、多级循环 .....        | 12-48 |
| 例11 .....                       | 12-28 | 三、复合循环 .....        | 12-49 |
| 例12 .....                       | 12-28 | 四、逐级循环 .....        | 12-50 |
| 12.2.4 冷却塔的操作 .....             | 12-29 | 五、复合同逐级循环的组合 .....  | 12-51 |
| 一、水的补充 .....                    | 12-29 | 12.3.5 蒸汽压缩设备 ..... | 12-52 |
| 例13 .....                       | 12-29 | 一、导论 .....          | 12-52 |
| 二、通风机的功率(马力) .....              | 12-30 | 二、离心式压缩机 .....      | 12-52 |
| 三、泵功率(马力) .....                 | 12-31 | 三、操作特性 .....        | 12-54 |
| 四、除雾 .....                      | 12-31 | 四、压缩机容量的控制 .....    | 12-54 |
| 五、能量管理 .....                    | 12-32 | 五、往复式压缩机 .....      | 12-54 |
| 12.2.5 自然通风塔 .....              | 12-34 | 六、压缩的基本知识 .....     | 12-55 |
| 例14 .....                       | 12-35 | 七、影响压缩机容量的因素 .....  | 12-56 |
| 12.2.6 喷水池 .....                | 12-35 | 例17 .....           | 12-58 |
|                                 |       | 八、往复压缩机容量控制 .....   | 12-60 |

|                   |       |                     |       |
|-------------------|-------|---------------------|-------|
| 九、螺杆压缩机           | 12-60 | 一、氮-4               | 12-82 |
| 十、螺杆压缩机的性能        | 12-60 | 二、氢                 | 12-82 |
| 十一、螺杆压缩机容量控制      | 12-62 | 三、氮                 | 12-82 |
| 十二、蒸汽喷射           | 12-62 | 四、空气                | 12-82 |
| 十三、影响容量的因素        | 12-63 | 五、氧                 | 12-82 |
| 十四 容量控制           | 12-64 | 六、甲烷                | 12-83 |
| 12.3.6 吸收系统       | 12-65 | 12.4.4 致冷及液化原理      | 12-83 |
| 一、导论              | 12-65 | 12.4.5 致冷及液化方法      | 12-83 |
| 二、说明              | 12-65 | 一、等焓膨胀              | 12-83 |
| 三、平衡图             | 12-66 | 二、等熵膨胀              | 12-85 |
| 四、容量控制            | 12-67 | 三、综合等焓和等熵膨胀         | 12-85 |
| 五、单元效率            | 12-68 | 四 混合致冷循环            | 12-85 |
| 六、吸收致冷机的计算        | 12-68 | 12.4.6 致冷及液化系统的热力学分 |       |
| 七、氨-水吸收           | 12-71 | 析                   | 12-87 |
| 12.3.7 盐水         | 12-72 | 12.4.7 气体的分离和纯化     | 2-83  |
| 一、导论              | 12-72 | 一、林德(Linde)空分单塔系统   | 2-90  |
| 二、盐水的选择           | 12-72 | 二、分离空气的林德(Linde)双塔  |       |
| 三、盐水              | 12-73 | 系统                  | 12-90 |
| 四、有机化合物           | 12-74 | 三、从天然气中分离氮          | 12-91 |
| 五、腐蚀的防止           | 12-78 | 四、天然气加工             | 12-92 |
| 12.4 深冷过程         | 12-80 | 五、提纯                | 12-92 |
| 12.4.1 导论         | 12-80 | 12.4.8 贮存系统         | 12-93 |
| 12.4.2 低温下工程材料的性质 | 12-80 | 12.4.9 深冷系统的安全      | 12-97 |
| 一、强度、延展性及弹性模数     | 12-80 | 一、生理危害              | 12-98 |
| 二、比热              | 12-81 | 二、对材料和结构的危害         | 12-98 |
| 三、热导率             | 12-81 | 三、可燃性和爆炸危险          | 12-98 |
| 四、热膨胀率            | 12-81 | 四、高压气的危险            | 12-99 |
| 五、电阻率             | 12-82 | 五、小结                | 12-99 |
| 12.4.3 深冷液的性质     | 12-82 |                     |       |

## 第12篇 湿度测定法, 蒸发冷却, 致冷及深冷过程

---

作者:

|                  |         |
|------------------|---------|
| Eno Bagnoli      | 湿度测定法   |
| R. W. Norris     | 蒸发冷却及致冷 |
| T. M. Flynn      | 深冷过程    |
| K. T. Timmerhaus |         |

译者:

|     |                      |
|-----|----------------------|
| 徐敦颐 | 湿度测定法, 蒸发冷却及致冷, 深冷过程 |
| 林纪方 | 本篇审校人                |

3656/222)

2k 449/0112

## 第12篇 目 录

|                                 |       |                     |       |
|---------------------------------|-------|---------------------|-------|
| 12.1 湿度测定法 .....                | 12-5  | 例15 .....           | 12-37 |
| 12.1.1 名词解释 .....               | 12-5  | 12.2.7 冷却池 .....    | 12-38 |
| 12.1.2 湿球温度同绝热饱和温度的<br>关系 ..... | 12-6  | 例16 .....           | 12-40 |
| 例1 .....                        | 12-6  | 12.3 致冷 .....       | 12-41 |
| 12.1.3 湿度表的应用 .....             | 12-7  | 12.3.1 导论 .....     | 12-41 |
| 一、用例题说明湿度图的应用 .....             | 12-7  | 一、基本原理 .....        | 12-41 |
| 例2 .....                        | 12-8  | 二、定义 .....          | 12-41 |
| 例3 .....                        | 12-18 | 12.3.2 致冷剂性质 .....  | 12-42 |
| 例4 .....                        | 12-18 | 一、沸点和压力 .....       | 12-42 |
| 例5 .....                        | 12-19 | 二、冷冻温度 .....        | 12-42 |
| 例6 .....                        | 12-19 | 三、临界温度和压力 .....     | 12-42 |
| 例7 .....                        | 12-20 | 四、冷凝器和蒸发器的压力 .....  | 12-42 |
| 二、非大气压条件下湿度图的应用 .....           | 12-20 | 五、比容 .....          | 12-42 |
| 三、相对湿度和露点 .....                 | 12-21 | 六、潜热 .....          | 12-42 |
| 例8 .....                        | 12-21 | 七、液体的比热 .....       | 12-43 |
| 12.1.4 湿度的测量 .....              | 12-22 | 八、分子量 .....         | 12-43 |
| 一、露点法 .....                     | 12-22 | 九、理论吨马力 .....       | 12-43 |
| 二、湿球法 .....                     | 12-22 | 十、排出温度 .....        | 12-43 |
| 三、机械湿度计 .....                   | 12-22 | 十一、相溶性 .....        | 12-43 |
| 12.2 蒸发冷却 .....                 | 12-23 | 十二、安全方面 .....       | 12-43 |
| 12.2.1 原理 .....                 | 12-23 | 十三、其他所希望的性质 .....   | 12-43 |
| 12.2.2 冷却塔理论 .....              | 12-23 | 12.3.3 设备的选择 .....  | 12-43 |
| 例9 .....                        | 12-25 | 12.3.4 蒸汽压缩循环 ..... | 12-46 |
| 例10 .....                       | 12-25 | 一、单级致冷循环 .....      | 12-46 |
| 12.2.3 机械通风塔 .....              | 12-26 | 二、多级循环 .....        | 12-48 |
| 例11 .....                       | 12-28 | 三、复合循环 .....        | 12-49 |
| 例12 .....                       | 12-28 | 四、逐级循环 .....        | 12-50 |
| 12.2.4 冷却塔的操作 .....             | 12-29 | 五、复合同逐级循环的组合 .....  | 12-51 |
| 一、水的补充 .....                    | 12-29 | 12.3.5 蒸汽压缩设备 ..... | 12-52 |
| 例13 .....                       | 12-29 | 一、导论 .....          | 12-52 |
| 二、通风机的功率(马力) .....              | 12-30 | 二、离心式压缩机 .....      | 12-52 |
| 三、泵功率(马力) .....                 | 12-31 | 三、操作特性 .....        | 12-54 |
| 四、除雾 .....                      | 12-31 | 四、压缩机容量的控制 .....    | 12-54 |
| 五、能量管理 .....                    | 12-32 | 五、往复式压缩机 .....      | 12-54 |
| 12.2.5 自然通风塔 .....              | 12-34 | 六、压缩的基本知识 .....     | 12-55 |
| 例14 .....                       | 12-35 | 七、影响压缩机容量的因素 .....  | 12-56 |
| 12.2.6 喷水池 .....                | 12-35 | 例17 .....           | 12-58 |
|                                 |       | 八、往复压缩机容量控制 .....   | 12-60 |

|                   |       |                     |       |
|-------------------|-------|---------------------|-------|
| 九、螺杆压缩机           | 12-60 | 一、氮-4               | 12-82 |
| 十、螺杆压缩机的性能        | 12-60 | 二、氢                 | 12-82 |
| 十一、螺杆压缩机容量控制      | 12-62 | 三、氮                 | 12-82 |
| 十二、蒸汽喷射           | 12-62 | 四、空气                | 12-82 |
| 十三、影响容量的因素        | 12-63 | 五、氧                 | 12-82 |
| 十四 容量控制           | 12-64 | 六、甲烷                | 12-83 |
| 12.3.6 吸收系统       | 12-65 | 12.4.4 致冷及液化原理      | 12-83 |
| 一、导论              | 12-65 | 12.4.5 致冷及液化方法      | 12-83 |
| 二、说明              | 12-65 | 一、等焓膨胀              | 12-83 |
| 三、平衡图             | 12-66 | 二、等熵膨胀              | 12-85 |
| 四、容量控制            | 12-67 | 三、综合等焓和等熵膨胀         | 12-85 |
| 五、单元效率            | 12-68 | 四 混合致冷循环            | 12-85 |
| 六、吸收致冷机的计算        | 12-68 | 12.4.6 致冷及液化系统的热力学分 |       |
| 七、氨-水吸收           | 12-71 | 析                   | 12-87 |
| 12.3.7 盐水         | 12-72 | 12.4.7 气体的分离和纯化     | 2-83  |
| 一、导论              | 12-72 | 一、林德(Linde)空分单塔系统   | 2-90  |
| 二、盐水的选择           | 12-72 | 二、分离空气的林德(Linde)双塔  |       |
| 三、盐水              | 12-73 | 系统                  | 12-90 |
| 四、有机化合物           | 12-74 | 三、从天然气中分离氮          | 12-91 |
| 五、腐蚀的防止           | 12-78 | 四、天然气加工             | 12-92 |
| 12.4 深冷过程         | 12-80 | 五、提纯                | 12-92 |
| 12.4.1 导论         | 12-80 | 12.4.8 贮存系统         | 12-93 |
| 12.4.2 低温下工程材料的性质 | 12-80 | 12.4.9 深冷系统的安全      | 12-97 |
| 一、强度、延展性及弹性模数     | 12-80 | 一、生理危害              | 12-98 |
| 二、比热              | 12-81 | 二、对材料和结构的危害         | 12-98 |
| 三、热导率             | 12-81 | 三、可燃性和爆炸危险          | 12-98 |
| 四、热膨胀率            | 12-81 | 四、高压气的危险            | 12-99 |
| 五、电阻率             | 12-82 | 五、小结                | 12-99 |
| 12.4.3 深冷液的性质     | 12-82 |                     |       |

## 一般参考文献

**GENERAL REFERENCES:** Brown et al., *Unit Operations*, Wiley, New York, 1950. Coulson and Richardson, *Chemical Engineering*, vol. 1, McGraw-Hill, New York, 1955. *Handbook of Fundamentals*, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, New York, 1967. Penman, *Humidity*, Institute of Physics Monographs, London, 1955. Quinn, "Humidity: The Neglected Parameter," *Test Eng.* (July 1968). Sherwood and Pigford, *Absorption and Extraction*, 2d ed., McGraw-Hill, New York, 1952. Treybal, *Mass-Transfer Operations*, McGraw-Hill, New York, 1955. Walker, Lewis, McAdams, and Gilliland, *Principles of Chemical Engineering*, 3d ed., McGraw-Hill, New York, 1937. Wexler, *Humidity and Moisture*, vol. 1, Reinhold, New York, 1965. Wexler and Bombacher, NBS Circ. 512, September 1951. Zimmerman and Lavine, *Psychrometric Charts and Tables*, Industrial Research Service, 2d ed., Dover, N.H., 1964.

## 12.1 湿度测定法

湿度测定法关系到气-汽混合物的性质的测定。空气-水蒸汽系统是最常见的系统。

确定其他系统性质所牵涉到的原理与空气-水蒸汽系统相同，但有一例外，空气-水蒸汽系统的湿度比（传热系数与传质系数同湿热乘积的比，定义见下节），可取为1，而其他系统一般不等于1。由于这一点造成绝热饱和温度不等于湿球温度。因此对于非空气-水蒸汽系统，增湿和干燥问题的计算，由于需要对蒸发表面温度进行逐点计算而复杂化。例如，对于空气-水系统，即使气流的温度和湿度变化，在恒速率干燥期间，其表面蒸发温度是恒定的。而对于其他系统，该表面蒸发温度是变化的。

### 12.1.1 名词解释

与湿度测定法有关名词的解释及它们的关系式：

1. 绝对湿度 $H$  1(lb)干空气所含的水蒸汽量(lb)。假定该气体为理想气体，则 $H = M_w P / [M_a (P - p)]$ ，式中， $M_w$  = 水的分子量； $M_a$  = 空气的分子量； $p$  = 水蒸汽分压，atm； $P$  = 总压，atm。

在给定温度条件下若空气中水蒸汽分压 $p$ 等于同样温度条件下水的蒸汽压 $p_s$ ，这时空气被饱和，其绝对湿度记为饱和湿度 $H_s$ 。

2. 百分比绝对湿度（百分比饱和量） 绝对湿度与饱和湿度之比，由 $H/H_s = 100 p / (P - p_s) / [p_s (P - p)]$ 给出。

3. 百分比相对湿度 给定温度条件下空气中水蒸汽的分压除以该条件下水的蒸汽压。因此， $RH = 100 p / p_s$ 。

4. 露点或饱和温度 在该温度条件下所给出的水蒸汽和空气混合物达到饱和，亦就是给出的混合物中在该温度条件下水的蒸汽分压等于该温度条件下水的蒸汽压。

5. 湿热 $c$  1(lb)干空气和它所含的湿量的热容量。多数的工程计算 $c_s = 0.24 + 0.45H$ ，这里0.24和0.45分别是干空气和水蒸汽的热容量，并假定这两者是常数。

6. 湿体积 1(lb)干空气和它所含水蒸汽所占有的体积(ft<sup>3</sup>)。

7. 饱和体积 当空气饱和时的湿体积。

8. 湿球温度 由对流向水表面传递热量的速率等于由传质从表面所带走热量的速率时，达到的动态平衡温度。平衡时，假定忽略干球温度的变化，则在表面处的热量平衡为：

$$k_g \lambda (p_s - p) = h_c (t - t_w) \quad (12-1a)$$

式中  $k_g$  = 传质系数，lb/(h·ft<sup>2</sup>·atm)

$\lambda$  = 汽化潜热，Btu/lb

$p_s$  = 湿球温度条件下的蒸汽压，atm

$p$  = 环境条件下水蒸汽的分压，atm

$h_c$  = 传热系数，Btu/(h·ft<sup>2</sup>·°F)

$t$  = 空气-水蒸汽混合物的温度（干球温度），°F

$t_w$  = 湿球温度, °F

在通常条件下, 总压对分压和蒸汽压影响不大, 于是湿球温度的方程可用湿度差来表示:

$$H_s - H = (h_c / \lambda k') (t - t_w) \quad (12-1b)$$

式中  $k' = \text{lb}/(\text{h} \cdot \text{ft}^2)$  (单位湿度差)  $= (M_a / M_w) k_g = 1.6 k_g$ 。

#### 9. 绝热饱和温度, 或等熵线:

假如一股空气流与一定量水, 在温度  $T$  条件下, 系统为绝热, 相互很好地混合, 这时空气的温度下降而它的湿度增加。假如  $t_s$  是空气离开水时的平衡温度, 则  $t_s$  就是绝热饱和温度。表示空气的温度同湿度之间关系的曲线称之为绝热饱和线。绝热饱和线的方程为,

$$H_s - H = c_s / \lambda (t - t_s) \quad (12-2)$$

### 12.1.2 湿球温度同绝热饱和温度的关系

实验已证明空气-水系统的湿度比—— $h_c / k' c_s$  近似等于1。该条件下, 湿球温度同绝热饱和温度基本相等, 并可互换使用。严格地说, 随着湿度的增加绝热饱和温度同湿球温度之间的差值增加, 但对多数工程计算来说其影响是不重要的。

对于非空气-水系统,  $h_c / k' c_s$  值很明显地不等于1, 这时湿球温度同绝热饱和温度不再相等。对于这些系统可从传质传热类比来确定  $h_c / k'$ , 从而得到湿度比, 例如采用 Chilton—Colburn 类比 [Ind. Eng. Chem., 26, 1183 (1934)]。对于低湿度, 该类比给出

$$h_c / k' = c_s \left( \frac{\mu / \rho D_v}{c_s \mu / k} \right)^{2/3} \quad (12-3)$$

式中  $c_s$  = 湿热, Btu/(lb·°F)

$\mu$  = 粘度, lb/(ft·h)

$\rho$  = 密度, lb/ft<sup>3</sup>

$D_v$  = 扩散系数, ft<sup>2</sup>/h

$k$  = 热传导系数, Btu/(h·ft<sup>2</sup>) (°F/ft)。

全部物性均按气体混合物来算。

对于流过圆柱体的情况, 譬如流过湿球温度计。Bedingfield 同 Drew [Ind. Eng. Chem., 42, 1164 (1950)] 从他们由圆柱体向空气升华的数据以及其他关于湿球温度计的数据出发得到一关联式。对于在空气中的湿球温度计有

$$h_c / k' = 0.294 (\mu / \rho D_v)^{0.56} \quad (12-4)$$

这里的符号同式 (12-3)。若向气体中蒸发而不是向空气中蒸发, 式 (12-3) 的指数取 0.56。

这些式子的应用由例 1 来说明。

**例1** 大气压条件下的空气-水系统, 测得干球温度同湿球温度分别为 85°F 和 72°F。求绝对湿度, 并比较湿球温度和绝热饱和温度。假定  $h_c / k'$  由式 (12-4) 给出。

**解:** 对于比较干的空气, 其施密特数  $\mu / \rho D_v$  为 0.60, 按式 (12-4)  $h_c / k' = 0.294 (0.60)^{0.56} = 0.221$ 。72°F 时水的蒸汽压是 20.07 mmHg, 蒸发潜热为 1051.6 Btu/lb。按式 (12-1b),

$$[20.07 / (760 - 20.07)] (18/29) - H = (0.221 / 1051.6) (85 - 72)$$

$$\text{则 } H = 0.0140 \text{ lb 水} / (\text{lb 干空气})。$$

湿热算得  $c_s = 0.24 + 0.45 (0.0140) = 0.246$ 。从式 (12-2) 得到绝热饱和温度计算式

$$H_s - 0.0140 = (0.246 / 1051.6) (85 - t_s)$$

由湿度表的饱和曲线给出 $H_s$ 和 $t_s$ 的值,如图(12-2)。用试差法求得 $t_s=72.1^\circ\text{F}$ ,它比湿球温度高 $0.1^\circ\text{F}$ 。

### 12.1.3 湿度表的应用

图(12-1)~(12-3)给出低温、中温及高温范围三种空气-水蒸汽系统的图。图(12-4)给出修正了的Grosvenor图,化学工程师比较熟悉该图。这些图均只适用于绝对压强为1的条件下。表(12-2)给出的不是1个大气压情况下的校正值。图(12-5)给出空气中燃烧产品的湿度表。表(12-1)给出湿空气的热力学性质。

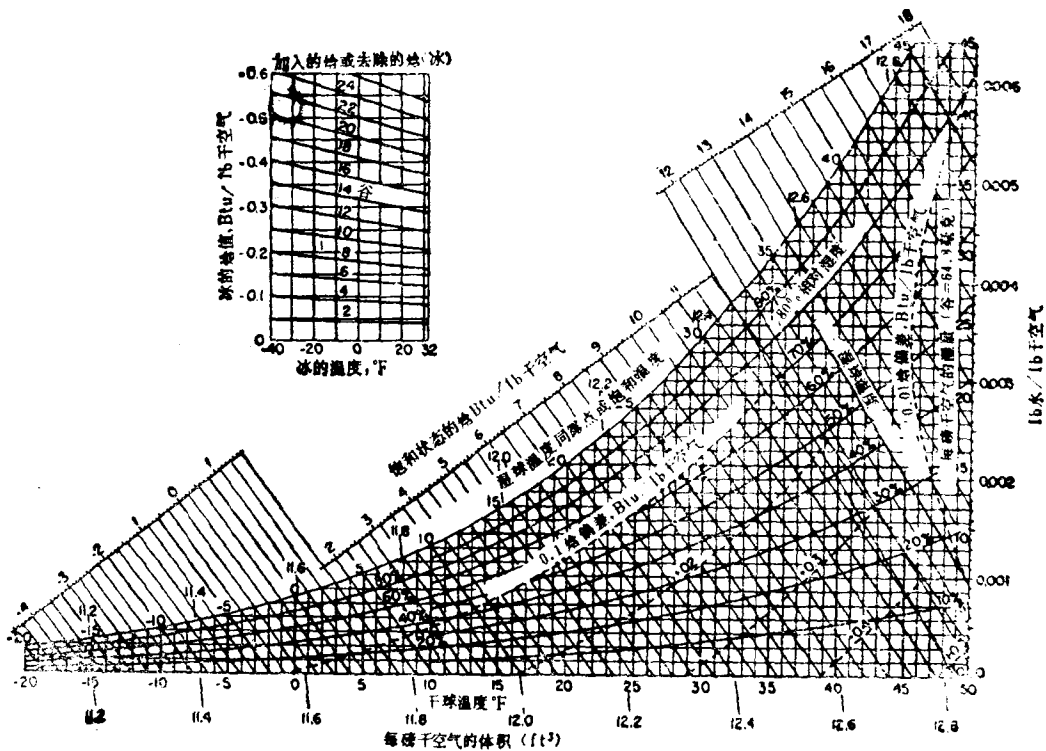


图 12-1 湿度图——低温, 表压29.921 inHg

#### 一、用例题说明湿度图的应用

例题中采用的符号如下:

$t$  = 干球温度,  $^\circ\text{F}$

$t_w$  = 湿球温度,  $^\circ\text{F}$

$t_d$  = 露点温度,  $^\circ\text{F}$

$H$  = 湿含量, lb水/(lb干空气)

$\Delta H$  = 空气流中加入的或去除的湿量, lb水/(lb干空气)

$h'$  = 饱和状态的焓, Btu/(lb干空气)

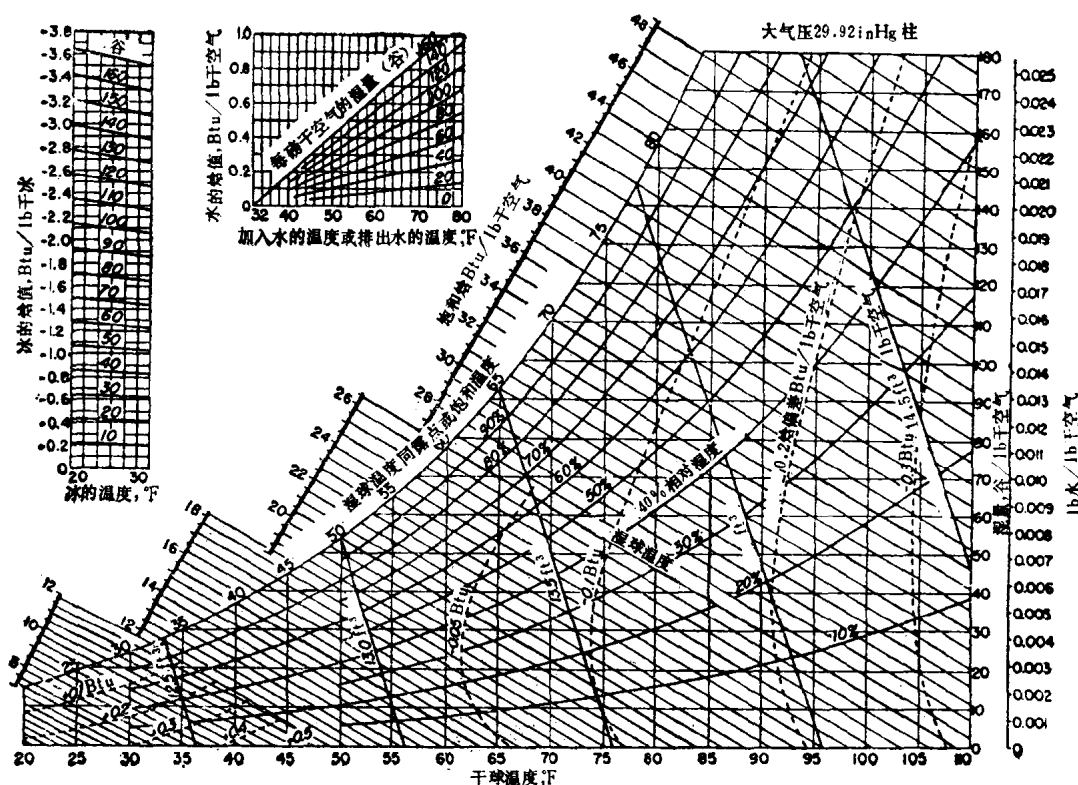


图 12-2 湿度图——中温，表压29.92inHg

$D$  = 焓偏差, Btu/(lb干空气)

$h = h' + D$  = 真实焓, Btu/(lb干空气)

$h_m$  = 加入系统或从系统中排除的水的焓, Btu/(lb干空气)

$q_a$  = 加入系统的热量, Btu/(lb干空气)

$q_r$  = 从系统中移去的热量, Btu/(lb干空气)

下标1, 2, 3等代表进口的状态以及其后继的状态。

例2 干球温度为80°F, 湿球温度为67°F时, 求湿空气的性质。

解: 直接从图12-2(图(12-6)给出图示例)读出:

湿含量  $H = 78 \text{ gr/lb干空气} = 0.0111 \text{ lb水/(lb干空气)}$

饱和状态焓  $h' = 31.6 \text{ Btu/(lb干空气)}$

焓偏差  $D = -0.1 \text{ Btu/(lb干空气)}$

真实焓  $h = 31.5 \text{ Btu/(lb干空气)}$

比容  $v = 13.8 \text{ ft}^3/(\text{lb干空气})$

相对湿度 = 51%

露点  $t_d = 60.3^\circ\text{F}$

例 表压为25.92inHg, 干球温度220°F以及湿球温度为100°F, 求  $H$ ,  $h$ , 以及  $v \cdot \Delta p =$   
- 4按表查得  $\Delta H_s = 50.4$ , 按注

$$\Delta H = \Delta H_s - \left( \frac{120}{24} \times 0.01 \times 50.4 \right) = 50.4 - 2.5 = 47.9$$

所以,  $H = 102$  (按图) + 47.9 = 149.9g/(lb干空气)



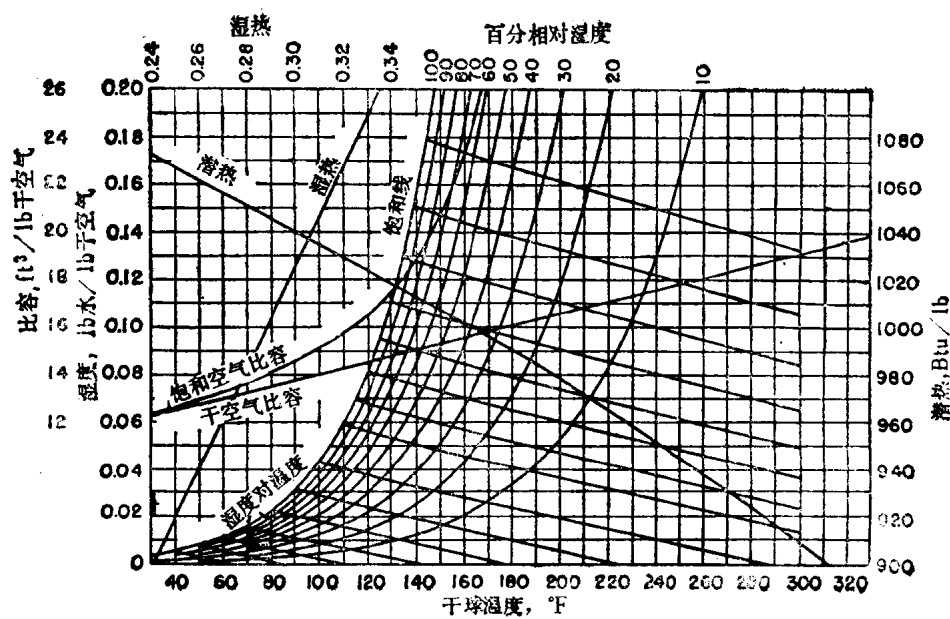


图 12-4 空气-水蒸汽混合物的湿度图

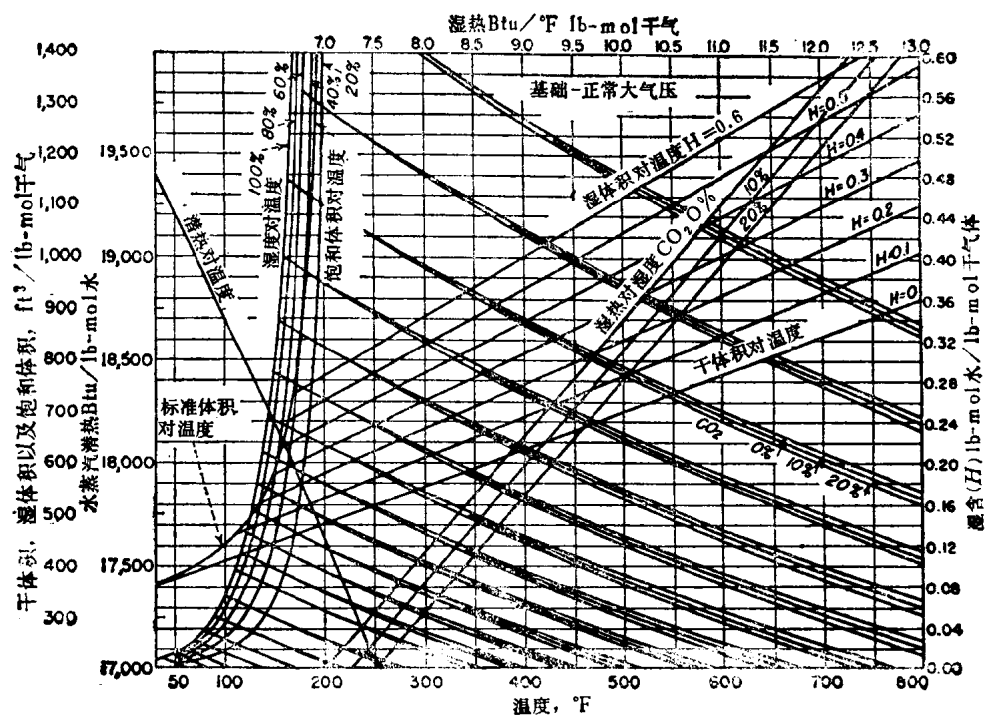


图 12-5 空气和燃烧产物，高温湿度图的修正图  
(基于水蒸汽和干气体的磅-摩尔数)

表 12-1 湿空气的热力学性质 (标准大气压 29.921inHg)

| 温度<br>$t, ^\circ\text{F}$ | 饱和湿度<br>$H_s \times 10^6$ | cu. ft. / lb 干空气体积 |           | B. t. u. / lb 干空气焓 |         |           | B. t. u. / (°F) (lb. 干空气焓) |          |           | 冷 凝 水                    |                                 | 温度 $t, ^\circ\text{F}$ |                                 |      |
|---------------------------|---------------------------|--------------------|-----------|--------------------|---------|-----------|----------------------------|----------|-----------|--------------------------|---------------------------------|------------------------|---------------------------------|------|
|                           |                           | $v_a$              | $v_{a,s}$ | $v_a$              | $h_a$   | $h_{a,s}$ | $h_a$                      | $g_a$    | $g_{a,s}$ | 焙 B. t. u. /<br>lb $h_w$ | 焓 B. t. u. /<br>(lb) (°F) $S_w$ |                        | 蒸汽压 in.<br>Hg $p_s \times 10^4$ |      |
| -160                      | 0.2120                    | 7.520              | 0.000     | 7.520              | -38.504 | 0.000     | -38.504                    | -0.10300 | 0.00000   | -0.10300                 | -222.00                         | -0.4907                | 0.1009                          | -160 |
| -155                      | 3869                      | 7.647              | .000      | 7.647              | -37.296 | .000      | -37.296                    | -0.09901 | .00000    | -0.09901                 | -220.40                         | -0.4853                | .1842                           | -155 |
| -150                      | 6932                      | 7.775              | .000      | 7.775              | -36.088 | .000      | -36.088                    | -0.09508 | .00000    | -0.09508                 | -218.77                         | -0.4800                | .3301                           | -150 |
| -145                      | 1.219                     | 7.902              | .000      | 7.902              | -34.881 | .000      | -34.881                    | -0.09121 | .00000    | -0.09121                 | -217.12                         | -0.4747                | .5807                           | -145 |
| -140                      | 2.109                     | 8.029              | .000      | 8.029              | -33.674 | .000      | -33.674                    | -0.08740 | .00000    | -0.08740                 | -215.44                         | -0.4695                | 1.004                           | -140 |
| -135                      | 3.586                     | 8.156              | .000      | 8.156              | -32.468 | .000      | -32.468                    | -0.08365 | .00000    | -0.08365                 | -213.75                         | -0.4642                | 1.707                           | -135 |
| -130                      | 6.000                     | 8.283              | .000      | 8.283              | -31.262 | .000      | -31.262                    | -0.07997 | .00000    | -0.07997                 | -212.03                         | -0.4590                | 2.858                           | -130 |
|                           | $H_s \times 10^7$         |                    |           |                    |         |           |                            |          |           |                          |                                 |                        | $p_s \times 10^0$               |      |
| -125                      | 0.9887                    | 8.411              | .000      | 8.411              | -30.057 | .000      | -30.057                    | -0.07634 | .00000    | -0.07634                 | -210.28                         | -0.4538                | 0.4710                          | -125 |
| -120                      | 1.606                     | 8.537              | .000      | 8.537              | -28.852 | .000      | -28.852                    | -0.07277 | .00000    | -0.07277                 | -208.52                         | -0.4485                | .7653                           | -120 |
| -115                      | 2.571                     | 8.664              | .000      | 8.664              | -27.648 | .000      | -27.648                    | -0.06924 | .00000    | -0.06924                 | -206.73                         | -0.4433                | 1.226                           | -115 |
| -110                      | 4.063                     | 8.792              | .000      | 8.792              | -26.444 | .000      | -26.444                    | -0.06577 | .00000    | -0.06577                 | -204.92                         | -0.4381                | 1.939                           | -110 |
| -105                      | 6.340                     | 8.919              | .000      | 8.919              | -25.240 | .001      | -25.239                    | -0.06234 | .00000    | -0.06234                 | -203.09                         | -0.4329                | 3.026                           | -105 |
| -100                      | 9.772                     | 9.046              | .000      | 9.046              | -24.037 | .001      | -24.036                    | -0.05897 | .00000    | -0.05897                 | -201.23                         | -0.4277                | 4.666                           | -100 |
|                           | $H_s \times 10^6$         |                    |           |                    |         |           |                            |          |           |                          |                                 |                        | $p_s \times 10^4$               |      |
| -95                       | 1.489                     | 9.173              | .000      | 9.173              | -22.835 | .002      | -22.833                    | -0.05565 | .00000    | -0.05565                 | -199.35                         | -0.4225                | 0.7111                          | -95  |
| -90                       | 2.242                     | 9.300              | .000      | 9.300              | -21.631 | .002      | -21.629                    | -0.05237 | .00001    | -0.05236                 | -197.44                         | -0.4173                | 1.071                           | -90  |
| -85                       | 3.342                     | 9.426              | .000      | 9.426              | -20.428 | .003      | -20.425                    | -0.04913 | .00001    | -0.04912                 | -195.51                         | -0.4121                | 1.597                           | -85  |
| -80                       | 4.930                     | 9.553              | .000      | 9.553              | -19.225 | .005      | -19.220                    | -0.04595 | .00001    | -0.04594                 | -193.55                         | -0.4069                | 2.356                           | -80  |
| -75                       | 7.196                     | 9.680              | .000      | 9.680              | -18.022 | .007      | -18.015                    | -0.04280 | .00002    | -0.04278                 | -191.57                         | -0.4017                | 3.441                           | -75  |
| -70                       | 10.40                     | 9.806              | .000      | 9.806              | -16.820 | .011      | -16.809                    | -0.03969 | .00003    | -0.03966                 | -189.56                         | -0.3965                | 4.976                           | -70  |
| -65                       | 14.91                     | 9.932              | .000      | 9.932              | -15.617 | .015      | -15.602                    | -0.03663 | .00005    | -0.03658                 | -187.53                         | -0.3913                | 7.130                           | -65  |
|                           | $H_s \times 10^5$         |                    |           |                    |         |           |                            |          |           |                          |                                 |                        | $p_s \times 10^3$               |      |
| -60                       | 2.118                     | 10.059             | .000      | 10.059             | -14.416 | .022      | -14.394                    | -0.03360 | .00006    | -0.03354                 | -185.47                         | -0.3861                | 1.0127                          | -60  |
| -55                       | 2.982                     | 10.186             | .000      | 10.186             | -13.214 | .031      | -13.183                    | -0.03061 | .00009    | -0.03052                 | -183.39                         | -0.3810                | 1.4258                          | -55  |
| -50                       | 4.163                     | 10.313             | .001      | 10.314             | -12.012 | .043      | -11.969                    | -0.02766 | .00012    | -0.02751                 | -181.29                         | -0.3758                | 1.9910                          | -50  |
| -45                       | 5.766                     | 10.440             | .001      | 10.441             | -10.811 | .060      | -10.751                    | -0.02474 | .00015    | -0.02459                 | -179.16                         | -0.3707                | 2.7578                          | -45  |
| -40                       | 7.925                     | 10.566             | .001      | 10.567             | -9.609  | .083      | -9.528                     | -0.02186 | .00021    | -0.02165                 | -177.01                         | -0.3655                | 3.7906                          | -40  |
| -35                       | 10.81                     | 10.693             | .002      | 10.695             | -8.408  | .113      | -8.295                     | -0.01902 | .00028    | -0.01874                 | -174.84                         | -0.3604                | 5.1713                          | -35  |

续表

| 温度<br>$t, ^\circ\text{F.}$ | 饱和湿度<br>$H_s \times 10^4$ | cu. ft./lb 干空气体积 |          |        | $B, t. u./lb$ 干空气焓 |          |        | $B, t. u./(^{\circ}\text{F.})$ (lb. 干空气焓) |          |          | 冷 凝 水                 |                                                    | 温度 $t, ^\circ\text{F.}$ |                                  |
|----------------------------|---------------------------|------------------|----------|--------|--------------------|----------|--------|-------------------------------------------|----------|----------|-----------------------|----------------------------------------------------|-------------------------|----------------------------------|
|                            |                           | $v_a$            | $v_{as}$ | $v_a$  | $h_a$              | $h_{as}$ | $h_a$  | $g_a$                                     | $g_{as}$ | $g_a$    | 焓 $B, t. u./lb$ $h_w$ | 焓 $B, t. u./$<br>(lb)( $^{\circ}\text{F.}$ ) $s_w$ |                         | 蒸汽压 in.<br>$H_s P_s \times 10^4$ |
| $H_s \times 10^4$          |                           |                  |          |        |                    |          |        |                                           |          |          |                       |                                                    |                         |                                  |
| -30                        | 1.464                     | 10.820           | 0.002    | 10.822 | -7.207             | .154     | -7.053 | -0.01621                                  | 0.00038  | -0.01583 | -172.64               | -0.3552                                            | 0.70046                 | -30                              |
| -25                        | 1.969                     | 10.946           | .004     | 10.950 | -6.005             | .207     | -5.798 | -0.01342                                  | .00051   | -0.01291 | -170.42               | -0.3500                                            | .94212                  | -25                              |
| -20                        | 2.630                     | 11.073           | .005     | 11.078 | -4.804             | .277     | -4.527 | -0.01067                                  | .00068   | -0.00999 | -168.17               | -0.3449                                            | 1.2587                  | -20                              |
| -15                        | 3.491                     | 11.200           | .006     | 11.206 | -3.603             | .368     | -3.235 | -0.00796                                  | .00089   | -0.00707 | -165.90               | -0.3398                                            | 1.6706                  | -15                              |
| -10                        | 4.606                     | 11.326           | .008     | 11.334 | -2.402             | .487     | -1.915 | -0.00529                                  | .00115   | -0.00414 | -163.60               | -0.3346                                            | 2.2035                  | -10                              |
| -5                         | 6.040                     | 11.452           | .011     | 11.463 | -1.201             | .639     | -0.562 | -0.00263                                  | .00149   | -0.00114 | -161.28               | -0.3295                                            | 2.8896                  | -5                               |
| $H_s \times 10^2$          |                           |                  |          |        |                    |          |        |                                           |          |          |                       |                                                    |                         |                                  |
| 0                          | 0.7872                    | 11.578           | .015     | 11.593 | 0.000              | .835     | 0.835  | 0.00000                                   | .00192   | 0.00192  | -158.93               | -0.3244                                            | 3.7645                  | 0                                |
| 5                          | 1.020                     | 11.705           | .019     | 11.724 | 1.201              | 1.085    | 2.286  | .00260                                    | .00246   | .00506   | -156.57               | -0.3193                                            | 4.8779                  | 5                                |
| 10                         | 1.315                     | 11.831           | .025     | 11.856 | 2.402              | 1.401    | 3.803  | .00518                                    | .00314   | .00832   | -154.17               | -0.3141                                            | 6.2858                  | 10                               |
| 15                         | 1.687                     | 11.958           | .032     | 11.990 | 3.603              | 1.800    | 5.403  | .00772                                    | .00399   | .01171   | -151.76               | -0.3090                                            | 8.0565                  | 15                               |
| 20                         | 2.152                     | 12.084           | .042     | 12.126 | 4.804              | 2.302    | 7.106  | .01023                                    | .00504   | .01527   | -149.31               | -0.3039                                            | 10.272                  | 20                               |
| 25                         | 2.733                     | 12.211           | .054     | 12.265 | 6.005              | 2.929    | 8.934  | .01273                                    | .00635   | .01908   | -146.85               | -0.2988                                            | 13.032                  | 25                               |
| 30                         | 3.454                     | 12.338           | .068     | 12.406 | 7.206              | 3.709    | 10.915 | .01519                                    | .00796   | .02315   | -144.36               | -0.2936                                            | 16.452                  | 30                               |
| 32                         | 3.788                     | 12.388           | .075     | 12.463 | 7.686              | 4.072    | 11.758 | .01617                                    | .00870   | .02487   | -143.36               | -0.2916                                            | 18.035                  | 32                               |
| 32*                        | 3.788                     | 12.388           | .075     | 12.463 | 7.686              | 4.072    | 11.7 8 | .01617                                    | .00870   | .02487   | 0.04                  | 0.0000                                             | 18.037                  | 32*                              |
| 34                         | 4.107                     | 12.438           | .082     | 12.520 | 8.167              | 4.418    | 12.585 | .01715                                    | .00940   | .02655   | 2.06                  | .0041                                              | 19.546                  | 34                               |
| $p_s$                      |                           |                  |          |        |                    |          |        |                                           |          |          |                       |                                                    |                         |                                  |
| 36                         | 4.450                     | 12.489           | .089     | 12.578 | 8.647              | 4.791    | 13.438 | .01812                                    | .01016   | .02828   | 4.07                  | .0081                                              | 0.21166                 | 36                               |
| 38                         | 4.818                     | 12.540           | .097     | 12.637 | 9.128              | 5.191    | 14.319 | .01909                                    | .01097   | .03006   | 6.08                  | .0122                                              | .22904                  | 38                               |
| 40                         | 5.213                     | 12.590           | .105     | 12.695 | 9.608              | 5.622    | 15.230 | .02005                                    | .01183   | .03188   | 8.09                  | .0162                                              | .24767                  | 40                               |
| 42                         | 5.638                     | 12.641           | .114     | 12.755 | 10.088             | 6.084    | 16.172 | .02101                                    | .01275   | .03376   | 10.09                 | .0202                                              | .26763                  | 42                               |
| 44                         | 6.091                     | 12.691           | .124     | 12.815 | 10.569             | 6.580    | 17.149 | .02197                                    | .01373   | .03570   | 12.10                 | .0242                                              | .28899                  | 44                               |
| 46                         | 6.578                     | 12.742           | .134     | 12.876 | 11.049             | 7.112    | 18.161 | .02293                                    | .01478   | .03771   | 14.10                 | .0282                                              | .31185                  | 46                               |
| 48                         | 7.100                     | 12.792           | .146     | 12.938 | 11.533             | 7.681    | 19.211 | .02387                                    | .01591   | .03978   | 16.11                 | .0321                                              | .33629                  | 48                               |
| 50                         | 7.658                     | 12.843           | .158     | 13.001 | 12.010             | 8.291    | 20.301 | .02481                                    | .01711   | .04192   | 18.11                 | .0361                                              | .36240                  | 50                               |
| 52                         | 8.256                     | 12.894           | .170     | 13.064 | 12.491             | 8.945    | 21.436 | .02575                                    | .01839   | .04414   | 20.11                 | .0400                                              | .39028                  | 52                               |
| 54                         | 8.894                     | 12.944           | .185     | 13.129 | 12.971             | 9.644    | 22.615 | .02669                                    | .01976   | .04645   | 22.12                 | .0439                                              | .42004                  | 54                               |

续表

| 温度<br>$t, ^\circ\text{F}$ | 饱和湿度<br>$H, \times 10^3$ | cu.ft./lb干空气体积 |          |        | B.t.u./lb干空气焓 |          |       | B.t.u./( $^\circ\text{F}$ )(lb.d干空气焓) |          |         | 冷 凝 水             |                                             |                       | 温度 $t, ^\circ\text{F}$ |
|---------------------------|--------------------------|----------------|----------|--------|---------------|----------|-------|---------------------------------------|----------|---------|-------------------|---------------------------------------------|-----------------------|------------------------|
|                           |                          | $v_a$          | $v_{as}$ | $v_s$  | $h_a$         | $h_{as}$ | $h_s$ | $g_a$                                 | $g_{as}$ | $g_s$   | 给B.t.u./lb. $h_w$ | 潜B.t.u./<br>(lb.)( $^\circ\text{F}$ ) $s_w$ | 蒸汽压 $p_a \times 10^4$ |                        |
| 56                        | 9.575                    | 12.995         | 0.200    | 13.195 | 13.452        | 10.39    | 23.84 | 0.02762                               | .02121   | 0.04833 | 24.12             | 0.0478                                      | 0.45176               | 56                     |
| 58                        | 10.30                    | 13.045         | .216     | 13.261 | 13.932        | 11.19    | 25.12 | .02855                                | .02276   | .05131  | 26.12             | .0517                                       | .48558                | 58                     |
| 60                        | 11.08                    | 13.096         | .233     | 13.329 | 14.413        | 12.05    | 26.46 | .02948                                | .02441   | .05389  | 28.12             | .0555                                       | .52159                | 60                     |
| 62                        | 11.91                    | 13.147         | .251     | 13.398 | 14.893        | 12.96    | 27.85 | .03040                                | .02616   | .05656  | 30.12             | .0594                                       | .55994                | 62                     |
| 64                        | 12.80                    | 13.197         | .271     | 13.468 | 15.374        | 13.94    | 29.31 | .03132                                | .02803   | .05935  | 32.12             | .0632                                       | .60073                | 64                     |
| 66                        | 13.74                    | 13.247         | .292     | 13.539 | 15.855        | 14.98    | 30.83 | .03232                                | .03002   | .06225  | 34.11             | .0670                                       | .64411                | 66                     |
| 68                        | 14.75                    | 13.298         | .315     | 13.613 | 16.335        | 16.09    | 32.42 | .03314                                | .03213   | .06527  | 36.11             | .0708                                       | .69019                | 68                     |
| $H, \times 10^3$          |                          |                |          |        |               |          |       |                                       |          |         |                   |                                             |                       |                        |
| 70                        | 1.582                    | 13.348         | .339     | 13.687 | 16.816        | 17.27    | 34.09 | .03405                                | .03437   | .06842  | 38.11             | .0746                                       | .73915                | 70                     |
| 72                        | 1.667                    | 13.398         | .364     | 13.762 | 17.297        | 18.53    | 35.83 | .03495                                | .03675   | .07170  | 40.11             | .0784                                       | .79112                | 72                     |
| 74                        | 1.819                    | 13.449         | .392     | 13.841 | 17.778        | 19.88    | 37.66 | .03585                                | .03928   | .07513  | 42.10             | .0821                                       | .84624                | 74                     |
| 76                        | 1.948                    | 13.499         | .422     | 13.921 | 18.259        | 21.31    | 39.57 | .03675                                | .04197   | .07872  | 44.10             | .0859                                       | .90470                | 76                     |
| 78                        | 2.086                    | 13.550         | .453     | 14.003 | 18.740        | 22.84    | 41.58 | .03765                                | .04482   | .08247  | 46.10             | .0896                                       | .96665                | 78                     |
| 80                        | 2.233                    | 13.601         | .486     | 14.087 | 19.221        | 24.47    | 43.69 | .03854                                | .04784   | .08638  | 48.10             | .0933                                       | 1.0323                | 80                     |
| 82                        | 2.389                    | 13.651         | .523     | 14.174 | 19.702        | 26.20    | 45.90 | .03943                                | .05105   | .09048  | 50.09             | .0970                                       | 1.1017                | 82                     |
| 84                        | 2.555                    | 13.702         | .560     | 14.262 | 20.183        | 28.04    | 48.22 | .04031                                | .05446   | .09477  | 52.09             | .1007                                       | 1.1752                | 84                     |
| 86                        | 2.731                    | 13.752         | .602     | 14.354 | 20.663        | 30.00    | 50.66 | .04119                                | .05807   | .09926  | 54.08             | .1043                                       | 1.2529                | 86                     |
| 88                        | 2.919                    | 13.803         | .645     | 14.448 | 21.144        | 32.09    | 53.23 | .04207                                | .06189   | .10396  | 56.08             | .1080                                       | 1.3351                | 88                     |
| 90                        | 3.118                    | 13.853         | .692     | 14.545 | 21.625        | 34.31    | 55.93 | .04295                                | .06596   | .10890  | 58.08             | .1116                                       | 1.4219                | 90                     |
| 92                        | 3.330                    | 13.904         | .741     | 14.645 | 22.106        | 36.67    | 58.78 | .04382                                | .07025   | .11407  | 60.07             | .1153                                       | 1.5135                | 92                     |
| 94                        | 3.556                    | 13.954         | .795     | 14.749 | 22.587        | 39.18    | 61.77 | .04469                                | .07480   | .11949  | 62.07             | .1188                                       | 1.6102                | 94                     |
| 96                        | 3.795                    | 14.005         | .851     | 14.856 | 23.068        | 41.85    | 64.92 | .04556                                | .07963   | .12519  | 64.06             | .1224                                       | 1.7123                | 96                     |
| 98                        | 4.049                    | 14.056         | .911     | 14.967 | 23.548        | 44.68    | 68.23 | .04643                                | .08474   | .13117  | 66.06             | .1260                                       | 1.8199                | 98                     |
| 100                       | 4.319                    | 14.106         | .975     | 15.081 | 24.029        | 47.70    | 71.73 | .04729                                | .09016   | .13745  | 68.06             | .1296                                       | 1.9333                | 100                    |
| 102                       | 4.606                    | 14.157         | 1.043    | 15.200 | 24.510        | 50.91    | 75.42 | .04815                                | .09591   | .14406  | 70.05             | .1332                                       | 2.0528                | 102                    |
| 104                       | 4.911                    | 14.207         | 1.117    | 15.324 | 24.991        | 54.32    | 79.31 | .04900                                | .1020    | .1510   | 72.05             | .1367                                       | 2.1786                | 104                    |
| $H, \times 10$            |                          |                |          |        |               |          |       |                                       |          |         |                   |                                             |                       |                        |
| 106                       | 5.234                    | 14.258         | 1.194    | 15.452 | 25.472        | 57.95    | 83.42 | .04985                                | .1085    | .1584   | 74.04             | .1403                                       | 2.3109                | 106                    |
| 108                       | 5.578                    | 14.308         | 1.278    | 15.586 | 25.953        | 61.80    | 87.76 | .05070                                | .1153    | .1680   | 76.04             | .1438                                       | 2.4502                | 108                    |