

矿井通风阻力及其测量

KUANGJING TONGFENG ZULI JI QI CELIANG

黄元平 编著

煤炭工业出版社

内 容 提 要

本书比较系统深入地论述了矿井通风阻力的基本理论及其测量方法。它以适用于现场实际工作的内容为重点,可供矿井生产、设计和院校的通风工作人员及师生参考使用。

矿 井 通 风 阻 力 及 其 测 量

黄 元 平 编 著

*

煤炭工业出版社 出版

(北京安定门外和平北路16号)

煤炭工业出版社印刷厂 印刷

新华书店北京发行所 发行

*

开本 $787 \times 1092^{1/32}$ 印张 $6^{7/8}$

字数 152 千字 印数 1-13,360

1979年8月第1版 1979年8月第1次印刷

书号15035·2233 定价0.72元

前 言

本书是《矿井通风阻力测量》一书的修订再版。原书自1957年出版后，不断得到读者的帮助和关心，使我获得很多教益。

《矿井通风阻力及其测量》同原书相比，在内容的选择上和论述的观点上都作了较大的修改。本书较详细地论述了矿井通风阻力的理论基础和测量方法。由于内容变动较多，故把原来的书名改为现名。

矿井通风工作是保证矿井安全生产的基本措施。通风阻力是矿井通风学科的重要组成部分。井巷的风阻是反映井巷通风能力的主要参数。分析研究矿井通风的任何问题，都同风阻有关。因此，通风阻力和风阻的测算工作是矿井通风技术管理的基础工作之一。只有做好这项工作，才能做好矿井通风技术管理和通风设计工作。

本书针对矿井通风阻力问题，是想把理论部分说清楚，把应用部分写细致，用通俗易懂、深入浅出的论述方法，编集一些适用于现场工作的内容，希望能对矿井通风阻力的实际工作有所帮助。但由于水平所限、实践经验不足，加上修编时间仓促，书中的缺点错误在所难免，衷心希望读者批评指正。

本书承蒙开滦煤矿戴国权同志和阳泉矿务局金元斌同志审阅，特致谢意。

目 录

第一章 空气的物理性质	1
第一节 空气的绝对静压	1
第二节 空气的温度	7
第三节 空气的湿度	11
第四节 空气的重率和密度	17
第二章 风流的运动状态和能量变化	23
第一节 风流的运动状态	23
第二节 风流中的各种能量	27
第三节 风流的能量变化规律	45
第三章 矿井通风阻力的分析	68
第一节 摩擦阻力	68
第二节 局部阻力和正面阻力	90
第三节 通风阻力定律和特性	110
第四章 矿井通风阻力的测量	120
第一节 用倾斜压差计测量井巷的风阻	122
第二节 测量井巷的摩擦阻力系数	145
第三节 用恒温压差计测量井巷的风阻	147
第四节 测量全矿井的井巷通风总阻力和总风阻	172
第五节 测定风筒的通风性能	197
第六节 测量全矿井通风阻力的分配情况	213

第一章 空气的物理性质

空气在井筒、巷道或风筒中流动时，会遇到各种阻力，这些阻力总称为通风阻力。空气的物理性质是讨论通风阻力的基础。本章对有关空气物理性质的基本内容作些介绍。

第一节 空气的绝对静压

一、绝对静压的意义和特点

作无规则运动的空气分子迅速不断地冲击容器壁面，因而在容器壁面上产生压力，这种压力作用在单位壁面上的绝对值叫做绝对静压，又叫做压强，度量单位是公斤/米²。

例如用气筒向球胆内打气，胆内迅速运动着的空气分子对胆壁产生的压强就是绝对静压。向胆内打气越多，胆壁所受的绝对静压越大。由于绝对静压的作用，使球胆在各个方向上均匀地鼓起来，这表明绝对静压的作用方向是四面八方的，而且在各个方向上，静压的强度是相等的。

从地表大气最高的真空层起到某一地点，整个空气柱的重量对该地点单位面积上产生的压力绝对值，也是绝对静压，习惯又叫做大气压力。对于井巷中的风流，任一断面上各个质点也都具有一项绝对静压值。各质点绝对静压的平均值就代表该断面上空气的绝对静压值。

二、压力的度量单位和换算

高度是 Z 米、底面积是 S 米²、每立方米的重量是 γ 公斤/米³的水柱，其底面积上所承受的总压力是：

$$F = Z S \gamma$$

其单位即 米 $\times$ 米² $\times$ 公斤/米³ = 公斤

每平方米的底面积上所受的壓力或压强是：

$$p = F/S = Z S \gamma / S = Z \gamma \quad \text{公斤/米}^2$$

上式表明：压强 p 值只和 Z 、 γ 有关，而和 S 无关。粗细两段水柱，只要它们的 Z 和 γ 两个数值分别相等，它们在底面积上所产生的压强 p 值必相同。

因一立方米体积纯净水的重量是1000公斤，即纯净水的 $\gamma = 1000$ 公斤/米³，故当水柱的高度 $Z = 1$ 米时，该水柱在它单位底面积上所产生的压力是：

$$p' = 1 \times 1000 = 1000 \quad \text{公斤/米}^2$$

当水柱的高度 $Z = 1$ 毫米 = $1/1000$ 米时，该水柱对它单位底面积上所产生的压力是：

$$p = 1/1000 \times 1000 = 1 \quad \text{公斤/米}^2$$

以上说明：可以用水柱 1 毫米的垂直高度（简称毫米水柱）来代表 1 公斤/米² 的压力值，即

$$1 \text{ 毫米水柱} = 1 \quad \text{公斤/米}^2$$

也就是说，可以用水柱垂高的大小来表示压力的大小。这个关系为测量空气压力提供了很大的方便。如图 1-1 所示，为了测量球胆内空气的绝对静压，暂时用一种示意性的测法（实际不用这种测法，详后）来讨论，即用一个内装纯净水的 U 形玻璃管，管的右端封口，并抽成真空；左端和橡皮管相接，皮管的另一端和球胆嘴相接。球胆内空气的绝对静压 p 传到玻璃管左边的水面上，玻璃管右边的水面上是真空，它的压力值是零。故玻璃管左右两水面的高差值 h 毫米水柱，就代表胆内空气的绝对静压值 p （公斤/米²）。前已说明， p 值和玻璃的断面积无关，断面大的或断面小的玻璃管

都可以，但断面太大的玻璃管不便于使用，断面太小的玻璃管，管壁可能粘上许多水珠（毛细管现象），也不适用。故在测量空气压力的仪器中，一般采用内径为 4~5 毫米的玻璃管。

当风流中的绝对压力较大时，例如风流中某点的绝对静压 $p = 10000$ 公斤/米²，就得用 10000 毫米或 10 米垂高的水柱来表示，这时要用大于 10 米长的玻璃管，很不方便。故对于较大的空气压力值，常用水银柱的垂高毫米（简称毫米水银柱）来表示。因为水银比水重 13.6 倍，所以表示同一

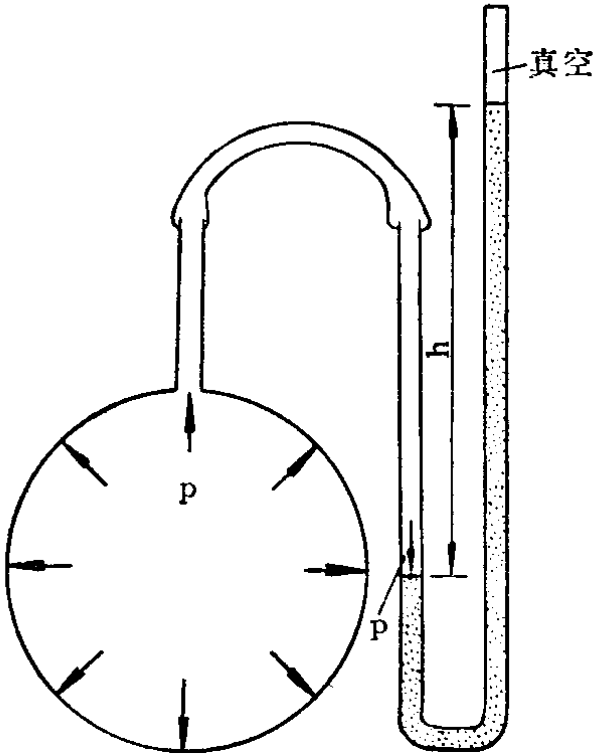


图 1-1 测量绝对静压的示意图

压力的水银柱垂高要小于水柱的垂高。如果在图 1-1 的 U 形玻璃管内改装入纯净的水银，当球胆内的空气压力不变时，两水银面的高差就比两水面的高差要小 13.6 倍。这就是说，1 毫米水银柱所代表的压力值，相当于 13.6 毫米水柱所代表的压力值。因此，要把表示同一压力的毫米水银柱的读数，换算为毫米水柱的读数，就须用 13.6 去乘毫米水银柱的读数，或者说，要把表示同一压力的毫米水柱的读数，换算为毫米水银柱的读数，就须用 13.6 去除毫米水柱的读数。设表示同一压力的 p 和 P 分别代表同一压力的毫米水柱（或公斤/米²）和毫米水银柱的读数，

则 $p = 13.6 P$ 毫米水柱 (或公斤/米²)

或 $P = p/13.6$ 毫米水银柱

现今有时又用毫巴 (1/1000巴) 作为绝对压力的另一种度量单位, 1 毫巴所代表的压力值, 相当于 3/4 毫米水银柱所代表的压力值。所以要把表示同一压力的毫巴的读数, 换算为毫米水银柱的读数, 就须用 3/4 去乘毫巴的读数, 或者说, 要把表示同一压力的毫米水银柱的读数, 换算为毫巴的读数, 就要用 3/4 去除 (或用 4/3 去乘) 毫米水银柱的读数。设 P' 是毫巴的读数,

则 $P = \frac{3}{4} P'$ 毫米水银柱

或 $P' = \frac{4}{3} P$ 毫巴

合并以上四式, 得

$$p = 13.6 P = 13.6 \times \frac{3}{4} P' = 10.2 P' \quad \text{毫米水柱} \quad (1-1)$$

或 $P = \frac{p}{13.6} = \frac{3}{4} P'$ 毫米水银柱

例 1-1 已知风流中的绝对静压是 760 毫米水银柱, 问表示这项压力的毫米水柱 (或公斤/米²) 和毫巴的读数 各为若干?

解 $p = 13.6 \times 760 = 10336$ 毫米水柱 = 10336 公斤/米²

$$P' = \frac{4}{3} \times 760 = 1013.33 \quad \text{毫巴}$$

例 1-2 已知风流中的绝对静压是 1020 毫巴, 问表示这项压力的毫米水银柱和毫米水柱的读数各为若干?

解 $P = \frac{3}{4} \times 1020 = 765$ 毫米水银柱

$p = 10.2 \times 1020 = 10404$ 毫米水柱或公斤/米²

风流任一测点的绝对静压都比较大，故常用毫米水银柱或毫巴作为度量单位，并要用读数是毫米水银柱或毫巴的仪表来测量。

三、绝对静压的测量

测量空气绝对静压的常用仪表有两种，一种是空盒气压计，另一种是水银气压计。

如图1-2所示，空盒气压计的主要部件是一个圆形的金属（黄铜或铝）真空盒，其上部被一皱纹的薄片所密封。当空气的绝对静压发生变化时，薄片随即向上或向下弯曲，用齿轮和杠杆的机械传动作用，把这种弯曲的变化量转变为气压计的指针在刻度盘上的转动量。刻度盘上有两种读数，一种读数（毫米水银柱）表示测点空气的绝对静压，另一种读数（米）表示测点所在位置的高度。空盒气压计和小闹钟差

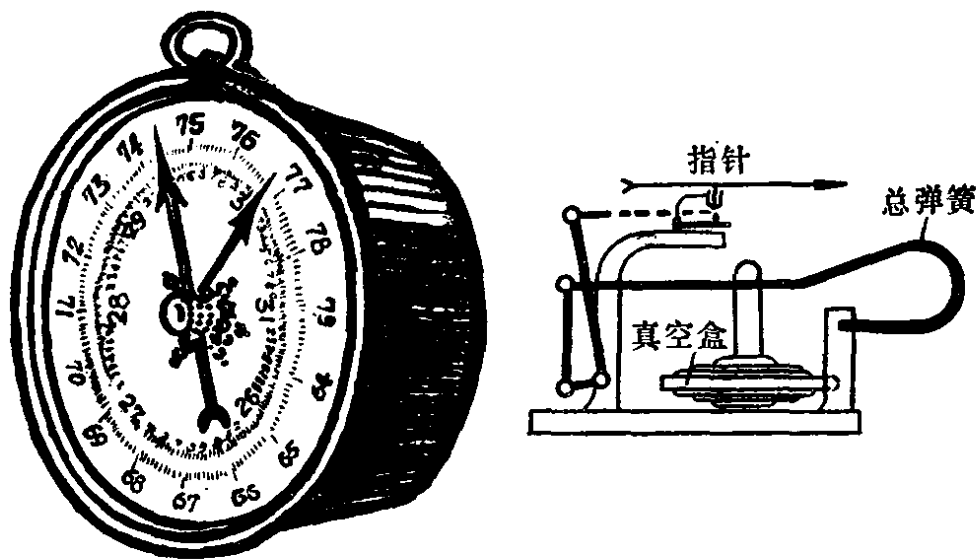


图 1-2 空盒气压计

不大，它的背面外壳上有一个小孔，内装一个调整螺旋，用小卡子转动这个螺旋，就能调整指针的位置。

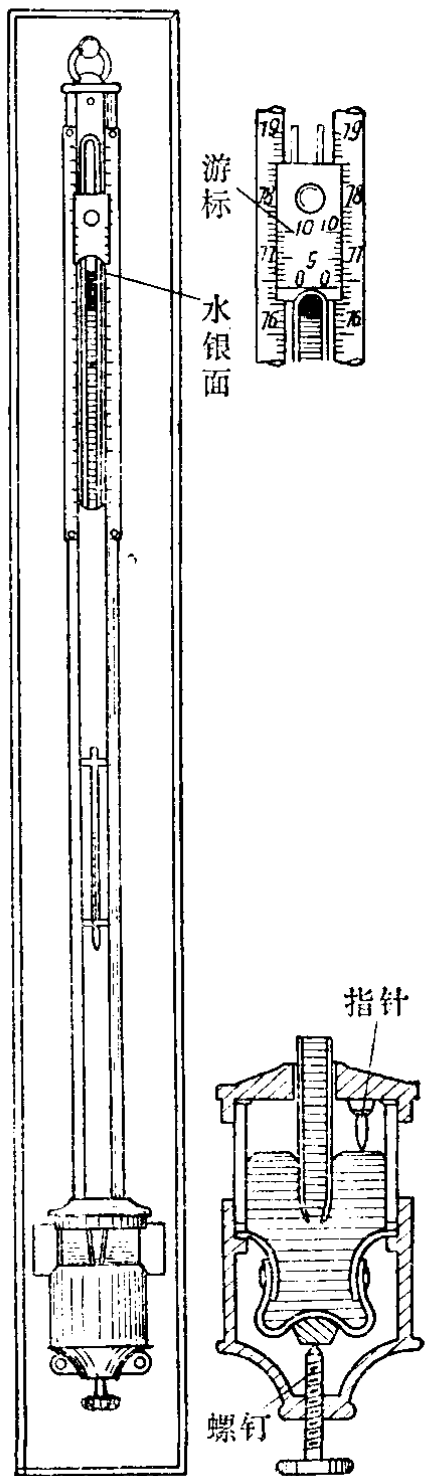


图 1-3 水银气压计

使用空盒气压计之前，须和图 1-3 所示的水银气压计进行校正，即转动空盒气压计的调整螺旋，使指针所指的读数和水银气压计的读数一致。测量风流中某点的绝对静压时，须使空盒气压计的刻度盘平行于风流的流动方向。因指针转动比较迟缓，读数之前，用手指轻击几下仪器，待指针稳定后再读取读数。又因真空盒上面薄片的弯曲弹性有一定的极限，所以它的读数有一定的范围，一般从360毫米水银柱到790毫米水银柱。如在较深的矿井内，有可能超出其最大的读数范围，这时指针停在最大读数上，不再转动。故在较深的矿井内时，要用读数范围较大的水银气压计来测量风流的绝对静压。

如图 1-3 所示，水银气压计有一根内装纯净水银的玻璃管，玻璃管的上端封口，管内水银柱的表面和封口之间是真空，玻璃管的下端开口，安插在水银池中。水银池的底部用柔性皮革制成，并和一螺钉相接触。转动螺钉，可使水银池中

的水银表面上下移动。水银池内有一根指针，它的尖端和刻度尺的零点位置相齐。测量风流的绝对静压时，须把水银气压计垂直悬挂，平稳以后，转动螺钉使水银池中的水银表面和指针的尖端刚好接触，表示水银池中的水银表面和刻度尺上的零点位置相齐；再转动刻度尺的游标，使游标上的零点和玻璃管内的水银表面相齐，根据游标上的零点所在位置，从刻度尺上读出绝对静压的整数，再根据游标上和刻度尺上某一位置相齐的刻度，读出小数点后数值。水银气压计约有1米长，只要小心，携带并不困难。

此外，还有一种不装水银液体的气压计〔11,70〕^①，其灵敏度和精确度也比较高，携带方便，读数范围从720至820毫米水银柱，最小读数是0.1毫米水银柱。附有一个放大镜，能使读数精确到0.05毫米水银柱。有些空盒气压计和无液气压计的读数是毫巴。

第二节 空气的温度

一、平常温度和绝对温度的关系

温度分为平常温度和绝对温度两种。平常温度是用一般温度计实测出来的温度，它的度量单位是摄氏度，用符号℃来表示。水在平常温度为摄氏零度（即0℃）时，便结成冰块，由液体变成了固体，故摄氏零度的平常温度又叫做冰点温度。为了应用方便，在摄氏冰点温度以上的平常温度值叫做正值；在摄氏冰点温度以下的平常温度值叫做负值。即平常温度有正负之分。

物质单位重量所占有的体积（米³/公斤）叫做物质的

① 括弧内逗号前的数值表示本书后所列参考书的排号，逗号后的数值表示有关内容在书刊上的页数。以后同。

比容积，又叫做容积度。或者说物质的比容积 v 就是物质的体积 V (米³) 和重量 G (公斤) 之比，

$$\text{即} \quad v = V/G \quad \text{米}^3/\text{公斤} \quad (1-2)$$

和其他物质一样，空气的比容积也有热胀冷缩的现象。当保持绝对静压不变时，在平常温度 0°C 以上，每升高平常温度一度，空气的比容积便能增加 $1/273.15$ 倍；在平常温度以下，每降低平常温度一度，空气的比容积便能减少 $1/273.15$ 倍。故从理论上说，当平常温度从 0°C 降到 -273.15°C 时，空气的比容积便减少到零。把比容积为零时的温度看作是零度（相当于平常温度 -273.15°C ），这个零度便叫做绝对温度的零度。绝对温度的度量单位是开尔文，用符号 $^\circ\text{K}$ 来表示。

绝对温度的零度 ($^\circ\text{K}$)，相当于摄氏温度的负 273.15 度 (-273.15°C)，在摄氏温度 -273.15°C 以上，摄氏温度每增加 1°C ，相应的绝对温度也增加 1°K ，故得摄氏温度 $t(^\circ\text{C})$ 和绝对温度 $T(^\circ\text{K})$ 的关系式是：

$$T = 273.15 + t \quad ^\circ\text{K}$$

对于一般精度的计算，可用：

$$T = 273 + t \quad ^\circ\text{K} \quad (1-3)$$

有些国家有时用华度温度作为平常温度的度量单位，用符号 $^\circ\text{F}$ 来表示。因摄氏温度的 0°C ，相当于华氏温度的 32°F ，摄氏温度增加或减少 1°C ，相当于华氏温度增加或减少 $9/5^\circ\text{F}$ 。故得摄氏温度 $t(^\circ\text{C})$ 和华氏温度 $t'(^\circ\text{F})$ 的关系式是：

$$t = \frac{5}{9}(t' - 32) \quad ^\circ\text{C}$$

或

$$t' = \frac{9}{5}t + 32 \quad ^\circ\text{F}$$

例 1-3 用温度计测得某处空气的温度是 -10°C ，问该处空气的绝对温度和华氏温度各为若干？

解 $T = 273 + (-10) = 263 \quad ^{\circ}\text{K}$

$$t' = \frac{9}{5}(-10) + 32 = 14 \quad ^{\circ}\text{F}$$

例 1-4 若测得某处空气的温度是 -4°F ，问该处空气的摄氏温度和绝对温度各为若干？

解 $t = \frac{5}{9}(-4 - 32) = -20 \quad ^{\circ}\text{C}$

$$T = 273 + (-20) = 253 \quad ^{\circ}\text{K}$$

例 1-5 相当于绝对温度 0°K 的摄氏温度和华氏温度各为若干？

解 $t = T - 273 = 0 - 273 = -273 \quad ^{\circ}\text{C}$

$$t' = \frac{9}{5}(-273) + 32 = -459.4 \quad ^{\circ}\text{F}$$

二、绝对温度和比容积的关系

以上的讨论可以说明，在空气的绝对静压保持不变的情况下，空气的比容积是和绝对温度成正比例的，即空气的比容积随着绝对温度的升高而增大。

设绝对温度为 T_1 时的比容积是 v_1 (米³/公斤)

绝对温度为 T_2 时的比容积是 v_2 (米³/公斤)

则得 $v_1 : v_2 = T_1 : T_2 \quad (1-4)$

上式就是当绝对静压保持不变时，绝对温度和比容积的关系式。

例 1-6 当大气压力 $P_1 = 760$ 毫米水银柱、平常温度 $t_1 = 0^{\circ}\text{C}$ 时，2 米³空气的重量是 2.568 公斤，试求：当 $P_2 = P_1$ 、而 $t_2 = 10^{\circ}\text{C}$ 时，空气的比容积 v_2 和 2 公斤空气的体积 V_2 各为

若干?

解 由 (1-2) 式得第一种状态时的比容积是

$$v_1 = 2/2.568 = 0.78 \text{ 米}^3/\text{公斤}$$

由 (1-4) 式得第二种状态时的比容积是

$$\begin{aligned} v_2 &= v_1 T_2 / T_1 \\ &= 0.78(273 + 10) / (273 + 0) \\ &= 0.81 \text{ 米}^3/\text{公斤} \end{aligned}$$

或

$$\begin{aligned} v_2 &= v_1 + v_1 \times 10/273 \\ &= 0.78 + 0.78 \times 10/273 = 0.81 \text{ 米}^3/\text{公斤} \end{aligned}$$

体积 $V_2 = 0.81 \times 2 = 1.62 \text{ 米}^3$

三、绝对温度、绝对静压和比容积的关系

当绝对温度保持不变而绝对静压发生变化时, 则绝对静压越变大, 比容积就越变小。即绝对温度不变时, 比容积和绝对静压成反比。

设 v_1 和 v_2 分别是绝对静压为 p_1 和 p_2 (公斤/米²) 时的比容积 (米³/公斤), 则得

$$v_1 : v_2 = p_2 : p_1 \quad (1-5)$$

上式就是绝对温度不变时, 绝对静压和比容积的关系式。

当绝对温度和绝对静压都发生变化时, 则综合 (1-4) 和 (1-5) 两式, 知比容积按照下式而变化:

$$v_1 : v_2 = T_1 : T_2 \times p_2 : p_1 \quad (1-6)$$

上式就是绝对温度和绝对静压都发生变化时, 计算比容积变化的关系式。

例 1-7 当绝对静压 $P_1 = 760$ 毫米水银柱、平常温度 $t_1 = 0^\circ\text{C}$ 时的比容积 $v_1 = 0.78 \text{ 米}^3/\text{公斤}$, 试求: 当绝对静压 $P_2 = 765$ 毫米水银柱、平常温度 $t_2 = 20^\circ\text{C}$ 时, 空气的比容积 v_2 和 2 公斤空气的体积 V_2 各为若干?

解 由 (1-6) 式得

$$\begin{aligned} v_2 &= v_1 T_2 p_1 / (T_1 p_2) \\ &= [0.78 \times (273 + 20) \times 760 \times 13.6] / \\ &\quad [(273 + 0) \times 765 \times 13.6] = 0.83 \text{ 米}^3/\text{公斤}。 \\ V_2 &= 0.83 \times 2 = 1.66 \text{ 米}^3 \end{aligned}$$

第三节 空气的湿度

一、空气湿度的意义

绝对湿度 单位体积或单位重量的空气中所含水蒸气重量的实际值或绝对值 (克/米³或克/公斤) 叫做空气的绝对湿度, 用符号 $\gamma_{\text{实}}$ 表示。含有一定量水蒸气的空气, 当它的温度升高时, 它的体积增大, 因而, 按单位体积计算的 $\gamma_{\text{实}}$ (克/米³) 值就变小。

饱和能力 单位体积或单位重量的空气能够容纳水蒸气量的极限能力或最大能力 (克/米³或克/公斤) 叫做空气的饱和能力, 用符号 $\gamma_{\text{饱}}$ 表示。当温度升高时, 空气的体积增大, 空气分子间的孔隙增大, 容纳水蒸气的能力增大。这就是说, 空气温度越高, 空气的饱和能力就越大。在正常大气压力的条件下, 空气在不同温度时, 相应的 $\gamma_{\text{饱}}$ 值如表1-1所示[3,564]。实际应用时, 可以根据实测的空气温度值, 在表中查出在正常大气压力下相应的 $\gamma_{\text{饱}}$ 值 (在表中不能直接查出的数值, 可用相邻的两个数值来估计)。

相对湿度 在温度相同和压力相同的条件下, 空气的绝对湿度和饱和能力的百分比叫做空气的相对湿度, 用符号 φ 表示。

$$\text{即} \quad \varphi = \frac{\gamma_{\text{实}}}{\gamma_{\text{饱}}} \times 100 \quad \% \quad (1-7)$$

由上式可知，当 $\varphi = 0$ 时，必然 $\gamma_{\text{实}} = 0$ ，意思是说，这时空气中没有水蒸气，这样的空气是绝对干燥的空气。由于井下各处的空气中都或多或少地含有水蒸气，所以井下几乎没有绝对干燥的空气；当 $\varphi = 100\%$ 时，必然 $\gamma_{\text{实}} = \gamma_{\text{饱}}$ ，意思是说，这时空气中所含的水蒸气已达到饱和状态。在一定温度和压力下， $\gamma_{\text{饱}}$ 的数值是个常数，则由上式可知， φ 和 $\gamma_{\text{实}}$ 是成正比例变化的。意思是说，空气的相对湿度越大，则空气的绝对湿度也越大，即表示这时的空气越潮湿。

表 1-1 饱和能力和饱和蒸气压力表

温度 (°C)	在 1 立方 米空气内 (克/米³)	在 1 公斤 空气内 (克/公斤)	水蒸气的 绝对压力 (毫米水 银柱)	温度 (°C)	在 1 立方 米空气内 (克/米³)	在 1 公斤 空气内 (克/公斤)	水蒸气的 绝对压力 (毫米水 银柱)
-20	1.1	0.8	0.96	14	12.0	9.8	11.99
-15	1.6	1.1	1.45	15	12.8	10.5	12.79
-10	2.3	1.7	2.16	16	13.6	11.2	13.64
-5	3.4	2.6	3.17	17	14.4	11.9	14.5
0	4.9	3.8	4.58	18	15.3	12.7	15.5
1	5.2	4.1	4.92	19	16.2	13.5	16.5
2	5.6	4.3	5.29	20	17.2	14.4	17.5
3	6.0	4.7	5.68	21	18.2	15.3	18.7
4	6.4	5.0	6.09	22	19.3	16.3	19.8
5	6.8	5.4	6.53	23	20.4	17.3	21.1
6	7.3	5.7	7.00	24	21.6	18.4	22.4
7	7.7	6.1	7.49	25	22.9	19.5	23.8
8	8.3	6.6	8.02	26	24.2	20.7	25.2
9	8.8	7.0	8.58	27	25.6	22.0	26.7
10	9.4	7.5	9.21	28	27.0	23.4	28.4
11	9.9	8.0	9.84	29	28.5	24.8	30.1
12	10.0	8.6	10.52	30	30.1	26.3	31.8
13	11.3	9.2	11.23	31	31.8	27.3	33.7

二、空气湿度的测算

在井下测算空气湿度时，多先用下述仪表测出空气的相对湿度，再计算出空气的绝对湿度。

测量空气湿度的仪表，式样较多〔11,94~107〕，其中井下常用而且构造简单的是手摇湿度计，如图 1-4 所示。这种仪表主要由干温度计和湿温度计组成，在湿温度计的水银球外表包着几层湿纱布。操作时，用手握住仪表的手把，用大约 120 转/分的速度，均匀地摇动旋转仪表1~2分钟，然后从上述两支温度计的刻度上分别读出空气的干温度 $t_{干}$ 值和空气的湿温度 $t_{湿}$ 值，最好重复操作 2~3次。在摇动仪表时，若空气中含水蒸气量比较少（即相对湿度较小），这种空气就比较容易吸收湿纱布上的水分，或者说湿纱布上的水分比较容易蒸发，湿纱布上的水分被蒸发越多，被湿纱布包着的水银球的温度就越降低，则 $t_{干}$ 和 $t_{湿}$ 之差越大，表示空气越干

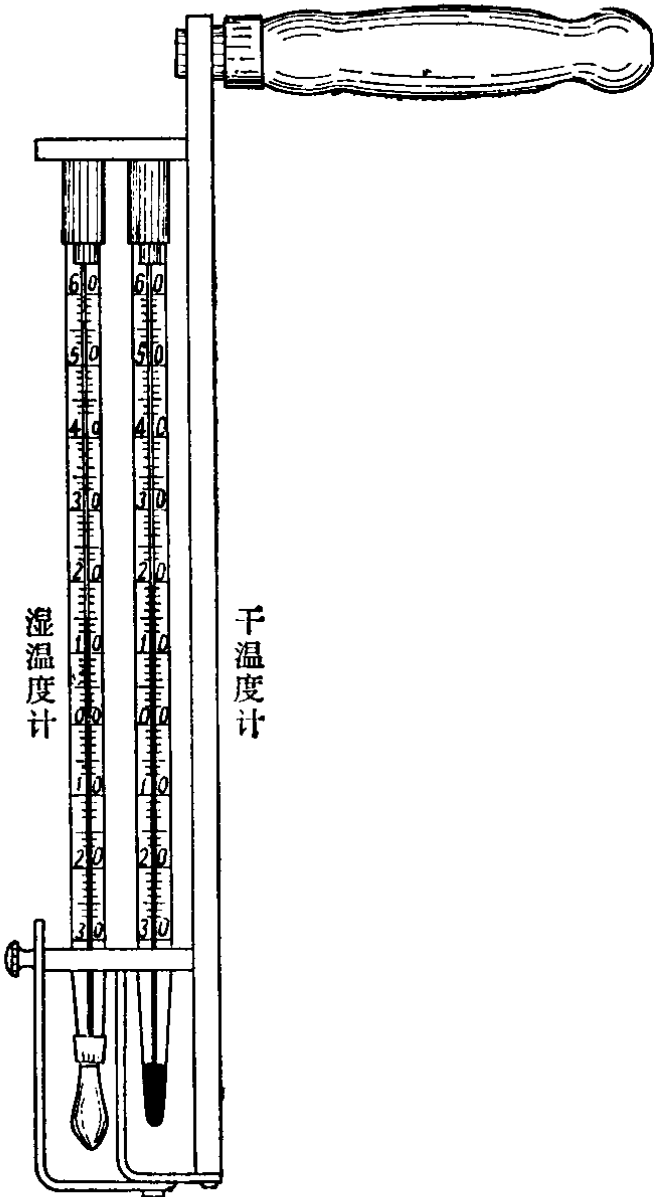


图 1-4 手摇湿度计