

第一章 呼吸气体的物理性质

第一节 大气的构成和大气压

一、大气的构成

气体是物质存在的状态之一。气体与液体或固体相比，分子间距最大，引力最小，分子运动的自由度最大。所以气体无固定形态，若不受外力影响，可无限扩散，也可向所接触的液体和固体的分子间隙中扩散，即溶解，直至达到平衡。

空气即是围绕地球表面的气体。在地球引力的作用下，空气形成包裹着地球的大气层，常被称为“大气”。大气系多种气体混合组成，气体成分比较固定。其中氮气占 78.084%，氧气占 20.946%，氩气占 0.934%，二氧化碳占 0.033%，其他如氦、氟、氖、氙和氢等气体共占 0.003%，此外还有水蒸气、灰尘和其他杂质。下面对几种主要气体分别作一介绍。

(一) 氧气

氧是地壳中含量最丰富的元素，几乎占地壳总质量的 50%，约占水总质量的 89%。氧气在空气中占 20.946%。在标准状态下，即 0℃、1 个绝对大气压 (ATA) 时，氧气的密度是 1.429g/L 比空气略重 (空气的密度是 1.293g/L)。在常压下，氧气在 -183℃ 时变为液体，在 -218.4℃ 时变为雪状的固体。氧气能与多种物质发生化学反应，是一种化学性质比较活泼的气体。氧气是空气中最重要的一种气体，也是机体维持生命活动最重要的气体。

(二) 氮气

氮气为无色、无味的气体，比空气稍轻。氮气在 1ATA、-195.8℃ 时变为无色液体，-209.86℃ 时为雪状固体。从化学性质上来看，氮气是一种惰性气体。但氮是生物体的重要组成成分。

(三) 二氧化碳

二氧化碳是一种无色、无味的气体。当二氧化碳浓度较高时，它具有一种酸臭味。其密度比空气大，微溶于水。在温度改变时易发生液化或固化。二氧化碳是机体氧化代谢的产物。正常浓度的二氧化碳是无毒的，但当机体中二氧化碳浓度过高或过低时对人体有害。

(四) 一氧化碳

空气中一氧化碳的含量甚微，只有 0.04×10^{-6} ，是一种无色、无味的气体，故难以感觉。其密度为 1.250g/L，比空气轻。常压下 -192℃ 时变为液体，-199℃ 时为固体。一氧化碳是碳氢化合物不完全燃烧时的产物，化学性质活泼，是一种毒性气体。在体内可严重妨碍血液携带氧气的功能，导致机体严重缺氧，对生命造成很大威胁。

(五) 氦气

氦气是一种惰性气体，无色和无味。氦在游离状态下是以单原子形式存在的。氦气是一种稀有元素，在空气中含量很少 (约 1/200 000)。氦气不溶于水，比空气轻得多，约为空气

质量的 1/7 而且氦气的沸点最低,为 -268.9°C 。在深潜水时,常以氦气作为氧的稀释剂。但在氦气环境中可产生语音失真,称为杜纳德·达克效应。此外,氦气有很高的导热性,使体热和呼吸热迅速散失。

(六) 氦气

氦气是一种无色和无味的气体,由两个氦原子结合而成,其化学特性非常活泼,以至于在地球上很少有游离状态的氦存在。氦是一种很轻的元素,广泛应用于气球和航空器中。氦气为易燃气体,且有爆炸的危险,务必慎用。

(七) 氖气

氖是一种无色和无味的单原子惰性气体,在大气中含量极少。在很低的压力下,氖是良导体,且能发出独特的橙黄色的光,故广泛应用于信号灯和广告牌的制造。氖是一种重气,且有优良的绝热性。

(八) 水蒸气

空气中含有一定量的水蒸气,即“湿度”。水蒸气含量与温度、环境中可蒸发的水量有关。详见本章第三节。

二、大气压

地球引力使包围着地球的气体产生重力,即压力。不断运动的空气分子对地球表面的碰撞称为大气压力。每单位面积 (cm^2) 上所受到的大气压力称为大气压(简称气压)。在地球纬度为 45° 处的海平面上温度为 0°C 时,每 1mol 空气体积为 22.4L 分子数为 6.02×10^{23} (阿伏伽德罗常数)此大气压力称为标准大气压亦即“常压”。标准大气压时的温度和压强称为“标准状态”。任何气体每 22.4L 中的分子数超过阿伏伽德罗常数,或温度升高以致分子碰撞的频率增高且力度加大,则气压升高,称为高压,反之为低气压。

气压的法定计量单位为帕斯卡 (Pa):

$$1\text{Pa} = 1\text{N}/\text{m}^2 (1\text{N} = 1\text{kg}\cdot\text{m}/\text{s}^2)$$

Pa 是一个很小的计量单位,通常用千帕 kPa 即 10^3Pa 或兆帕 MPa 即 10^6Pa 计算。

标准大气压为 101325Pa 即 101.325kPa 。

气压还可用毫米汞柱 (mmHg) 或千克每平方厘米 (kg/cm^2) 表示。在上述标准海拔和温度下,每平方厘米面积大气压力重量相当于相同面积上 76cm (760mm) 高度水银柱的重量由于水银比重为 $13.6\text{g}/\text{cm}^3$, 760mmHg 时的水银柱压力是: $13.6 \times 760 = 1.0336\text{kg}/\text{cm}^2 = 1033.6\text{g}/\text{cm}^2$ 。为计算方便通常以 $1\text{kg}/\text{cm}^2$ 为 1 个大气压。

在多种气体组成的混合气中,其中某一气体所产生的压强是该混合气总压强的一部分,这一部分压强就称为某一气体的分压。某一气体的分压大小与它在混合气中所占的百分比成正比。例如,氧气在干燥空气中所产生的分压值为: $760\text{mmHg} \times 20.9\% = 159\text{mmHg}$ 该分压值也称为氧分压。

机体各部都均匀地受到大气压力,因此测压表通常以标准大气压为“零点”。低于此值的气压为负压,高于此值者为正压。压力表上所显示的压值是附加于标准大气压之上的压值,称为附加压 (additional pressure) 亦称表压。

有时以真空为零点,所测得的气压值为绝对压 (absolute pressure)。

若用大气压的单位表示,那么:

$$\text{绝对压值} = \text{表压值 (单位: 大气压)} + 1$$

若以法定计量单位表示,则为:

$$\text{绝对压值 (kPa)} = \text{表压值 (kPa)} + 100\text{kPa}$$

$$\text{绝对压值(MPa)} = \text{表压值 (MPa)} + 0.1\text{MPa}$$

有时计算混合气中某一气体的分压值时以绝对压表示,例如空气中氧绝对压为 21kPa。

第二节 气体容积、压强和温度

一、概述

气体分子间距很大。在标准状态下,其分子间距为分子直径的 10 倍以上 分子间作用力近似于零。气体分子可向各方向运动,并可充满它能到达的整个空间。因此,气体无一定形态和体积,有很大的压缩性和扩散性,它的容量随容器的大小而改变。按阿伏伽德罗定律 在标准状态下(温度 0℃,1 个标准大气压),1mol 的气体容量为 22.4L 所含分子数为 6.02×10^{23} 阿伏伽德罗常数; 1cm^3 气体的分子数为 2.687×10^{19} (Loschmidt 常数)。

压力是垂直作用于物体表面上的力。压强是单位面积上受到的压力。在化学和多数工程学科中,压力概念相当于压强。单位时间内气体分子对器壁的总作用力叫气体压力,单位面积器壁所受的压力叫气体压强。压力的基本单位是帕斯卡 (Pa) 也有用标准大气压、千克力每平方米 (kgf/cm^2)、水柱(H_2O)、汞柱 (Hg) 表示的。在一个混合气体中,某一气体产生的压力被认为是该气体的分压。

温度是物理热强度的一个量值,是由热运动平均动能产生的,常用摄氏度 (℃ 或华氏度 (°F) 表示。在研究气体状态时 国际上采用热力学温标(即绝对温标 符号 T)表示。用热力学温标表示的温度叫热力学温度(即绝对温度)单位用开尔文 符号 K 表示。绝对零度表示气体完全停止运动,压强等于零。绝对零度大约等于 -273 或 -460°F 。绝对温度 (T) 与摄氏温度 (t) 的关系为:

$$T(\text{K}) = t(\text{℃}) + 273$$

如 0 的绝对温度为 273K。

二、气体容积、压强和温度的相互关系

气体的物理状态由压强、容积和温度三个物理量来描述。按分子运动论,对一定质量的气体来说,压强、容积和温度三个物理量都不变时,气体处于“稳定状态”。如三个物理量单独或同时变化或两个物理量变化即可引起气体状态的变化。一个物理量的变化,可引起其余物理量的相应变化。气体压强、容积和温度的变化导致的气体状态的改变遵循一定的规律,这些规律统称为气体定律。

(一)波义尔 - 马略特 Boyle-Marlotte 定律

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{p_2}{p_1} \quad \text{或} \quad p_1 V_1 = p_2 V_2$$

式中: p_1 ——初始压强(绝对压); p_2 ——终末压强(绝对压); V_1 ——初始容积; V_2 ——终末容积。

该定律说明气体容积与压力(压强)的关系:当温度不变时,一定质量气体的体积同它的压强成反比。

由式中可以看出,当气体温度不变时,一定质量的气体容积(V)与压强(p)的乘积是一个恒量(K)其公式为:

$$pV = K$$

也就是说,一定质量气体的压强越大 容积越小 反之 压强越小 容积越大。或者,气体密度的变化与压强成正比。

用分子运动学解释即是在一个容器内,气体分子的不断运动对容器壁撞击即产生气体对容器壁的压力,即压强。气体体积缩小,即密度增大,使气体分子与容器壁的撞击机会增多 即压强增大 反之 体积增大 压强就变小。

(二) 查理 Charles 定律

该定律说明气体的压强与温度的关系:当容积不变时,一定质量气体的压强与绝对温度成正比。或者,容积不变时,一定质量气体的温度每升高(或降低) 1°C 时 其压强增加(或降低)它在 0 时压强的 $1/273$ 其公式为:

$$p_t = p_0 \times (1 + t/273)$$

式中: p_t —— t 时气体的压强; p_0 ——在 0 时气体的压强; t ——实际气体温度($^{\circ}\text{C}$)。

利用绝对温度可简化查理定律的表述,在容积不变的情况下,一定质量气体在温度为 t_1 时压强为 p_1 ,温度为 t_2 时压强是 p_2 , T_1 、 T_2 分别代表 t_1 、 t_2 时的绝对温度,则:

$$p_1 = p_0 \times (1 + t_1/273) = p_0 T_1/273$$

$$p_2 = p_0 \times (1 + t_2/273) = p_0 T_2/273$$

由此得出:

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

查理定律用分子运动学解释为:气体分子的平均运动速度与温度密切相关,温度越高,分子的平均运动速度越大。一定质量的气体在容器中受热而温度升高时,气体分子的平均运动速度增大,气体分子对每单位容器壁的撞击次数增多,撞击力也增强,则气体的压强也增大,反之亦然。

(三) 盖 - 吕萨克(Gay-Lussac) 定律

盖 - 吕萨克定律说明气体容积与温度的关系:在气体压强不变时,一定质量气体的容积在温度每升高(或降低) 1°C 时 其容积增加(或减少)等于它在 0 时容积的 $1/273$ 。即压强不变时,一定质量气体容积与绝对温度成正比,其公式为:

$$V_t = V_0 \times (1 + t/273) \quad \text{或} \quad \frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

式中: V_t ——温度升高到 t 时气体的容积; V_0 ——温度在 0°C 时气体的容积; V_1 ——初始容积; V_2 ——终末容积; T_1 ——初始绝对温度; T_2 ——终末绝对温度。

应用分子运动学解释为:当一定质量的气体受热而温度升高时,如要它的压强不变,就只有使它的容积增大。结果,一方面由于温度升高,气体分子对每单位面积容器壁的撞击次数增多,而且每次撞击力增强;而另一方面由于容积增大,气体分子对每单位面积容器壁的撞击次数减少,且每次撞击力减少。这两种影响相反,使压强保持不变。

(四) 理想气体方程

上述三个气体定律是指一定质量气体的压强、容积和温度三个物理量中的一个量恒定

状况下，其他两个变量的关系。但在自然环境中决定气体状态的这三个物理量往往同时发生变化。理想气体方程就是关于一定质量气体的压强、容积和温度同时变化时的气体定律。

理想气体方程是：一定质量气体的压强、容积和温度都为变量时，气体的压强与容积的乘积同绝对温度成正比；或者说，压强与容积的乘积同绝对温度的比值是一个恒量。

其公式：

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$$

式中： p_1 、 V_1 、 T_1 ——初始状态时气体压强、容积、绝对温度； p_2 、 V_2 、 T_2 ——终末状态时气体压强、容积、绝对温度。

理想气体方程实际上是前面三个气体定律的综合。

(五) 道尔顿(Dalton)定律

各种互相不起化学反应的气体混合在一起组成混合气，混合气所产生的压强是各种气体压强的总和，称为“总压”，而组成混合气的各种气体各自所产生的压强称为“分压”。当温度不变时，混合气体的总压等于各组成气体的分压之和。其公式：

$$p = p_1 + p_2 + p_3 + \dots + p_n$$

式中： p ——混合气体的总压； p_1 、 p_2 、 p_3 、 p_n ——各组成气体的分压。

道尔顿定律的临床意义在于，知道了各组成气体的分压便可以求出混合气体的总压。同理，知道了混合气体的总压和各组成气体在混合气体中所占的浓度百分比，也可推算出某一组成气体的分压值。如下：

$$p_{1,2,\dots,n} = p \times C\%$$

式中： $p_{1,2,\dots,n}$ ——某一组成气体的分压； p ——混合气体总压； $C\%$ ——该气体在混合气体中浓度。

上述公式计算的气体是干燥气体，若计算肺泡气等潮湿气体的各种分压值时，应根据水蒸气分压修正，故公式改为：

$$p_{1,2,\dots,n} = (p - W) \times C\%$$

式中： $p_{1,2,\dots,n}$ ——某一组成气体的分压； p ——混合气体总压； W ——水蒸气分压； $C\%$ ——去掉水蒸气后干燥混合气体中某一气体的浓度。

气体对机体生理功能的影响和作用主要决定于气体分压值。当然，当百分浓度或混合气总压变化时，各种组成气体的分压也会相应变化，从而对机体生理功能产生影响和作用。

上述气体定律表达的是压强不太大、温度不太低的实验条件下气体容积、压强和温度间的变化规律。在任何温度和压强下都能遵守上述定律的气体为理想气体。理想气体实际上是不存在的。但我们平时接触到的气体(氧气、氮气、空气等)在常温、常压下，它们的性质近似于理想气体。因此，我们在讨论和研究气体性质时，可以按照以上气体定律考虑。

第三节 气体的密度、黏度和湿度

一、气体密度

密度即为每单位体积的质量，密度的单位为千克每立方米(kg/m^3)或克每立方厘米

(g/cm^3)，气体密度单位为克每升 (g/L)。

表示密度的公式：

$$\rho = \frac{m}{V}$$

式中： ρ ——密度； m ——物质质量； V ——物质容积。

气体作为物质，亦有其密度。但与固体或液体相比，气体的密度很小。因压强的变化使体积发生变化，其密度也随之变化。在标准状态下，1L 气体的质量为气体的标准密度。气体的密度与压强成正比，即一定质量的气体，当气压增大时，其体积缩小，密度即增大。因此，在标准状态下空气密度为 $1.3\text{g}/\text{L}$ 在 3 个标准大气压下，空气体积缩小至常压下的 $1/3$ ，其密度也随之增加 3 倍即 $1.3 \times 3 = 3.9\text{g}/\text{L}$ 。

在实际应用中，通常将空气密度定为 1，在温度和压强相同的条件下某种气体的密度与空气密度相比所得的比值作为这一气体的相对密度。

某些气体的标准密度和相对密度见表 1-1。

表 1-1 气体的标准密度 0°C 、1ATA 和相对密度 (以空气密度为 1)

气体名称	标准密度 (g/L)	相对密度
空气	1.30	1
氢气 (H_2)	0.09	0.0695
氙气 (Xe)	0.18	0.138
氡气 (Rn)	0.90	0.695
氮气 (N_2)	1.26	0.967
氧气 (O_2)	1.43	1.105
氩气 (Ar)	1.79	1.379
二氧化碳 (CO_2)	1.97	1.529

气体密度与呼吸功密切相关。气体密度增大，导致呼吸阻力加大，反之则小。氧气的密度比空气大，因此吸高浓度氧比吸空气易于疲劳。呼吸空气时的呼吸阻力比呼吸相同氧浓度的氮氧混合气的呼吸阻力大得多。

二、黏度

黏度表示的是使气体分子聚积在一起的黏和力。

遵循普瓦泽伊 (Poiseuille) 定律，表达公式如下：

$$\mu = \frac{\Delta p \pi r^4}{8LV}$$

式中： μ ——黏度； Δp ——压力差； π ——3.1416； r ——管腔半径； V ——流量； L ——管道长度。

普瓦泽伊定律表示黏度与气流经过特定长度的气道两端的压力差和气道半径的 4 次方成正比，与气道的长度和气体的流量成反比。

如果普瓦泽伊定律被重新排列，气流以一个恒定的速度通过一设定系统时，等式发生如下变化：

$$\frac{8\mu L}{\pi} = \frac{\Delta p r^4}{\dot{V}}$$

由于阻力 R 的表示公式为

$$R = \frac{\Delta p}{\dot{V}}$$

所以可转换为：

$$R = \frac{8\mu L}{\pi r^4}$$

上述等式右边体现了一个气体系统中阻力与气道的半径、长度和气体黏度之间的关系。黏度加大，阻力也相应加大。而且气道的半径缩小一半，气道的阻力增加 16 倍。若需保持流速恒定 压力应增加 16 倍。

常见气体的黏度见表 1-2。

表 1-2 常见气体的黏度 $p = 1$ 个大气压, $T = 273K$)

气体	分子量	黏度(μ) (Pa·s)($\times 10^{-5}$)	气体	分子量	黏度(μ) (Pa·s)($\times 10^{-5}$)
空气		17.05	CH ₄	16.04	10.3
H ₂	2.02	8.35	CO	28.0	16.6
Xe	4.0	18.6	CO ₂	44.0	14
N ₂	28.0	16.7	水蒸气	18.0	8.7
O ₂	32.0	19.2			

三、湿度

气体湿度是指一个气体系统中所含水蒸气量的多少。大气中水蒸气含量是变化不定的，温度和可蒸发水量是影响大气中水蒸气含量的两个主要因素。当温度上升时，水分子获得大量的运动能量而成气体状态，水蒸气量增加。水蒸气也产生分压，温度升高，水蒸气分压增大，由于整个系统的总压不变，这时系统中其他气体的分压就会降低。例如，空气中湿度增大时，氧气等其他气体的分压就会降低。在水达到沸点时，沸水上方的水蒸气压接近大气压，因此其他气体分压几近为零。

水蒸气含量有两种表达形式，即绝对湿度和相对湿度。绝对湿度是指水蒸气的实际量，通常用每单位体积空气中水的质量来表示 [如毫克每升 (mg/L) 或克每立方米 (g/m³)] 或用水蒸气分压表示 [如毫米汞柱 mmHg]。相对湿度 RH 是指在一定温度下 实际水蒸气含量与该温度饱和水蒸气含量即水蒸气容量的比值：

$$RH = \frac{\text{水蒸气实际含量}}{\text{该温度下水蒸气容量}} \times 100\%$$

例如 在 37 时水蒸气容量为 43.8mg/L 实际水蒸气含量是 22mg/L 则：

$$RH = \frac{22}{43.8} \times 100\% = 50.2\%$$

由于实际和饱和水蒸气含量均受温度影响，因此相对湿度也随温度变化而改变。当温度降低时，RH 因容量的减少而增高。如果温度降低到水蒸气容量小于水蒸气实际含量时，水蒸气处于完全饱和状态。正常情况下，吸入气经鼻、鼻咽部和口咽部湿化，气体到达肺部时水蒸气已饱和。上气道旁路形成时（人工气道），吸入气湿化不足，吸入气由下呼吸道湿化，呼出气就会带走肺部水分，引起局部干燥。故需要给吸入气额外提供水蒸气以提高湿

度，通常使用热雾化或热湿化系统供应水蒸气。

不同温度下水蒸气的绝对湿度见表 1-3。

表 1-3 不同温度下饱和水蒸气压

温度(°C)	PH ₂ O(mmHg)	温度(°C)	PH ₂ O(mmHg)	温度(°C)	PH ₂ O(mmHg)
20	17.5	26	25.2	34	39.9
21	18.7	27	26.7	36	44.6
22	19.8	28	28.3	38	49.8
23	21.1	29	30.0	40	55.4
24	22.4	30	31.8		
25	23.8	32	35.7		

第四节 气体流体动力学

气体运动符合流体动力学的原理，气体从高压处向低压处流动，气体的流动不仅与压力差有关而且与气体的容积、密度、黏度、流速和气流阻力等有关。

一、气体的流速与流量

流速 velocity 与流量 flow 是两个不同的概念 流速表示气体在两点间的运动速度 通常用厘米每秒 cm/s 表示；而流量是指每单位时间内通过某一点的气体容量，通常用升每分 (L/min) 表示。两者有一定关系，可相互转换。

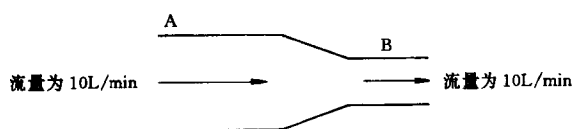


图 1-1 流量、流速和管腔截面积的关系

一般情况下，气体流体动力学遵循持续定律，它表示流量固定时气体通过的管腔横断面的大小与气体运动速度的乘积是一个常数。

由图 1-1 可见，A 与 B 两点的流量相同，但由于管腔横断面不同，A 点与 B 点的流速便不同，流速与管腔的横断面成反比，管腔越窄，流速越快，故 B 点流速较 A 点为快。

二、气流阻力

气流阻力是阻止气体通过一个系统的摩擦力。气流阻力与气流速度、气流方式和气道口径等有关。气流速度快或单位时间内的流量大，则阻力大；湍流比层流阻力大；气道口径小则阻力大。在人体，气流阻力主要产生于气管和支气管等直径大于 2mm 的气道，而小气道的阻力仅占总气道阻力的 20% 以下。气流阻力可以用下面的公式表示：

$$R = \frac{\Delta p}{V}$$

式中：R——阻力； Δp ——压力差；V——流量。

由上式可见，在气流阻力不变的情况下，为了增加流量，必须提高气道两端压力差。当

气流阻力增高时，如果气道两端压力差不变，必然造成流量降低。

有时用传导率来表示阻力大小。传导率是气道阻力的倒数，即：

$$\text{传导率} = \frac{\dot{V}}{\Delta p}$$

阻力是用厘米水柱每升秒 [cmH₂O/(L·s)] 表示，而传导率以升每分厘米水柱 [L/(min cmH₂O)] 或升每秒厘米水柱 [L/(s·cmH₂O)] 表示。

气体以两种形式在气道内流动，一种是层流，另一种是湍流。层流是平滑、无翻动的流动形式，前面有一圆锥型的前锋，在气流中央的气体分子的运动速度大于周边，主要由于周边气流受阻力影响。层流阻力 (R_L) 公式为：

$$R_L = \frac{\Delta p}{\dot{V}} = \frac{8L\mu}{\pi r^4}$$

普瓦泽伊定律也可用于解释一均质气体以持续的、非波动的层流方式通过一特定管腔时的临床状态和管腔半径 (r) 改变与气道阻力、压力 (Δp) 和流量 (V) 的关系。

湍流为一种混乱的、滚动的流动形式，前端无锋，所有气体分子以相同的运动速度碰撞管壁的各个部位，因此这种形式时气流阻力较层流为大。湍流阻力 (R_T) 公式为：

$$R_T = \frac{\Delta p}{\dot{V}^2}$$

从上述公式可见，湍流时管道的压力差大于层流时，层流的阻力与流量成反比，而湍流的阻力与流量的平方成反比，湍流的气流阻力受流量影响较层流大。

一般在较大的气管和流速快时以湍流方式为主，而在小气道、黏度高的气体以层流运动为主。较大呼吸道内，由于分支和管腔逐渐变细，可以存在层流和湍流两种形式。分叉和管腔直径改变处多为湍流形式，直的气道内气流以层流形式运动为主。

管腔内气流形式可通过雷诺 (Reynolds 数 Re) 预测，计算如下：

$$Re = \frac{\rho V_{el} D}{\mu}$$

式中： ρ ——气体密度； V_{el} ——气体流速； D ——气道直径； μ ——气体黏度。

当 $Re \geq 2000$ 时为湍流形式 $Re < 2000$ 时为层流形式。一般来说，在其他条件相同的情况下，密度低而黏度高的气体发生湍流的机会少。另外还与气道的直径大小有一定的关系，由于大气道有更多的空间给气体分子以翻滚和碰撞，所以大气道易发生湍流，而小气道以层流为主。黏度高的气体由于气体分子运动受影响，更易发生层流。

三、伯努利 Bernoulli 效应

伯努利效应是持续定律的扩展，它提示：当气流通过一个连续的气流系统时，透壁压与气体的流速成反比，即流速增大时，透壁压降低。伯努利效应可用能量不灭定律解释，能量既不能再造，也不能消灭，它只能进行形态改变。在一个持续流动非引力依赖型气体环境中能量以两种形式存在，一是动力能量 (KE)，另一为透壁能量 (P_{trans})。透壁能量是指抵抗管腔侧壁的能量，而动力能量与气体密度 (ρ) 和流速 (V_{el}) 有关。KE 公式表示为：

$$KE = 0.5\rho V_{el}^2$$

$$\text{总能量} = KE + P_{trans} = 0.5\rho V_{el}^2 + P_{trans}$$

当气体通过的管腔的直径变小 流速加快 动力能量变大 透壁压必然变小 而当管腔直径恢复原有大小时, 流速和透壁压也恢复至原有水平。另外, 在相同流速下, 当气体通过一狭窄气道时, 气体的密度越小, 透壁压改变也越少。

文丘里 (Venturi) 原理 (图 1-2) 是伯努利效应的延伸, 它允许第二股气流的进入。假如气道的直径小到一定水平以下时, 一恒定气流在最狭窄处的透壁压接近于大气压, 这是因为通过狭窄处的气体流速极高使动力能明显增高所致。文丘里原理进一步指出狭窄管壁与远端扩张的管壁成角不超过 15° 时, 气道以横断面增大容纳第二股气流的进入, 近似大气压的透壁压基本保持不变。

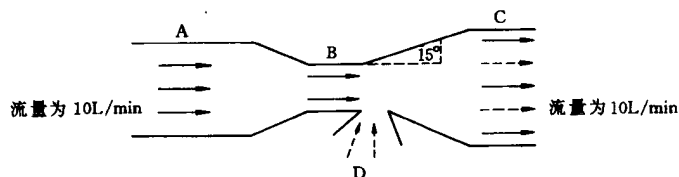


图 1-2 文丘里原理

B 点透壁压接近大气压, 第二股气流从 D 点进入, 狭窄管壁与远端扩张的管壁成角不超过 15° 时 C 点与 A 点的透壁压基本保持不变

按文丘里原理, 如氧气为源气, 通过一狭窄管道, 即从侧口夹带空气, 那么空气夹带量受管道狭窄程度以及侧口大小的控制。管道越狭窄或侧口越大, 夹带空气的量就越多。

四、呼吸功

功 (W) 的物理概念是力 (F) 与距离 (d) 的乘积。

$$W = Fd$$

从呼吸生理来说, 力可以用压力代替, 而距离可用容积代替。因此, 临床上呼吸功 (WOB) 为压力 p 与容积 (V) 的乘积 即:

$$WOB = pV$$

呼吸功用焦耳每升 (J/L) 或千克米每升 ($\text{kg}\cdot\text{m}/\text{L}$) 表示 (1J 相当于 $10\text{kg}\cdot\text{m}$)。每单位时间的功被称为功率, 用焦耳每分 (J/min) 或千克米每分 ($\text{kg}\cdot\text{m}/\text{min}$) 表示。

呼吸功的大小取决于呼吸运动中各种阻力的总和, 成人安静时为 $0.082\text{J}/\text{min}$ 作最大限度呼吸时可达 $40.9\text{J}/\text{min}$ 。机械通气时, 如自主呼吸消失, 呼吸肌完全松弛, 机械通气的潮气量与吸气压力的乘积即为呼吸功。

不同呼吸频率和潮气量时的呼吸功消耗情况不同。呼吸频率增快, 克服弹性阻力的消耗功减少, 但克服气道阻力的消耗功增加。

上海华东医院 朱惠莉

复旦大学附属中山医院 蔡映云

参 考 文 献

1. 曾远文 杨自觉, 物理学, 成都: 四川大学出版社, 1997. 125 ~ 128
2. 章梓雄 董曾南, 黏性流体力学, 北京: 清华大学出版社, 1998. 10 ~ 389
3. 张兆顺 崔桂香, 流体力学, 北京: 清华大学出版社, 1999. 202 ~ 379

4. Douglas JF, Gasiorek JM. 流体力学. 汤全明译. 北京 高等教育出版社, 1992. 6 ~ 77
- 5 茅春浦流体力学上海: 上海交通大学出版社, 1995. 412 ~ 435
6. Pierson DV, Kacmarek RM. Foundations of respiratory care. New York: Ave' McCracken, 1997. 3 ~ 20
7. Kacmarek RM, Mack C, Dimas S. Essentials of respiratory care. Chicago: Year Book Medical Publishers, 1990
8. Scacci R. Air entrainment masks: jet mixing is how they work; the Bernoulli and Venturi principles is how they don't. *Respir Care*, 1979, 24; 928 ~ 934
9. 陈次青. 生理学. 呼吸. 北京: 人民卫生出版社, 1991. 116 ~ 145
10. 刘又宁. 机械通气与临床. 北京: 科学出版社, 1998. 10 ~ 15

第二章 呼吸系统的应用解剖

第一节 气道

气道由鼻、咽、喉、气管、主支气管、叶支气管、段支气管、亚段支气管、细支气管和终末细支气管等组成。通常以喉部环状软骨下缘为界，分为上呼吸道与下呼吸道。

一、上呼吸道

上呼吸道包括鼻、咽、喉三部分。

(一)鼻

鼻是呼吸道的门户，位于硬腭之上。鼻腔由鼻中隔分成左、右两部分，气体由外鼻孔经鼻腔从后鼻孔直通至鼻咽部。鼻中隔在相当一部分人群中具有一定的偏斜度，经鼻气管插管时必须引起注意。鼻腔的侧壁有三个骨性突起，即为上鼻甲、中鼻甲、下鼻甲，呈弯曲状态伸入腔内，各鼻甲下方的空隙形成上、中、下三个鼻道，鼻窦和鼻泪管开口于此。

整个鼻腔黏膜为假复层柱状纤毛上皮，黏膜中含有大量的杯状细胞、黏液腺、浆液腺和混合型腺体等；另外，鼻黏膜血供非常丰富，当黏膜充血膨胀时，接触面积就明显增加。黏膜的这些特点十分有利于将吸入气体迅速湿润和加温，建立人工气道时则因气流直接通向气管而失去了这种非特异性的保护机制。另外，血供丰富的鼻黏膜在经鼻气管插管时很容易被损伤而引起出血，尤其是血供最为丰富的鼻中隔前下部，因此需引起重视。

(二)咽

咽部属于呼吸道与消化道的共用通道。咽部自上而下可分为三部分：鼻咽部、口咽部与喉咽部。鼻咽部位于鼻腔的后方，与鼻后孔相连，以蝶骨与枕骨的底部为上界，以软腭与腭垂为下后界，是呼吸的重要通道。鼻咽部有着丰富的淋巴组织，当其发生炎症而肿胀时易引起气道阻塞。口咽部位于口腔后方，往上借助咽峡与鼻咽部相通，往下则与喉咽部相连，在口咽部的外侧壁有扁桃体和成群的淋巴样组织。喉咽部位于喉的后方，上皮组织从喉咽部一直延伸至环状软骨之后形成食管。

(三)喉

喉是呼吸通道和发音的重要器官，上与喉咽部相连，下与气管相通。喉腔由会厌软骨、甲状软骨、环状软骨以及成对的小角软骨、杓状软骨和楔状软骨构成，其间有关节、喉肌和韧带等相连接。喉腔的上部为会厌，从舌根一直向喉的后上方延伸。在正常状态下，呼吸时会厌开放，吞咽时会厌肌收缩，将喉顶部及时关闭，以避免食物进入呼吸道；若会厌活动障碍，异物就会进入气道。因此，会厌部在保持呼吸道通畅、避免误吸方面起着非常重要的作用。喉腔最狭窄部分是声门，声门是两侧声带之间的裂隙，随呼吸而开闭。在深吸气时，声门大开，在吞咽、咳嗽动作之前和用力屏气时，声门即予关闭。

二、下呼吸道

下呼吸道从气管、主支气管、叶支气管、段支气管、亚段支气管、细支气管、终末细支气管直至呼吸性细支气管、肺泡道、肺泡囊等共有 24 级分支。终末细支气管以上部分为气体传导气道；从呼吸性细支气管到肺泡囊部分，为气体交换气道。

(一) 气管

气管上自喉的环状软骨，下至纵隔内的气管分叉，平均长度为 10~13cm 其中一半在颈部，居于颈中线，位于食管前方；一半在胸内，通过结缔组织固定在上纵隔，因主动脉弓而使气管稍向右偏。气管横径为 1.5~2.0cm 比矢径大 25%。气管由 16~20 个环状软骨以及平滑肌、结缔组织等构成，软骨环呈马蹄形，开口朝向背面，由结缔组织和平滑肌连接成气管膜部，使气管呈一管状结构，从而使气管既不易塌陷，又能舒缩自如，更有利于保持气道的通畅。气管的位置与长度受人体所处的位置与活动状态的影响，头部尽量前屈时气管上方的环状软骨仅超出胸骨上凹 1cm；而当头极度后仰时竟可超过 7cm 在这两种状态之间，气管长度变化可达 50%。在仰卧位呼气时，气管分叉位于第 5 胸椎上端水平；在俯卧位时，隆突（气管分叉形成的嵴）可向腹侧移动 2cm 左右，在吞咽时，气管颈段可上移 3cm 而隆突部位仅上移 1cm。

(二) 主支气管

气管在第 5 胸椎上缘水平分叉，分为左、右主支气管。右主支气管较左主支气管短、粗、直，仅由 3~4 个软骨环组成，长 1~2.5cm 直径平均为 1.22cm 与气管中线夹角为 25°~30°。基于这些形态特点，吸入异物时易从右主支气管进入右侧支气管树，尤其是右下叶，吸入性病变更发生率亦以右侧居多。左主支气管由 7~8 个软骨环组成，长约 5cm 直径小于 1.22cm，与气管中线夹角为 40°~50°，显得较为细长。左、右主支气管之间的角度大小对临床有十分重要的意义，角度过小提示可能存在一侧主支气管受压移位；角度过大提示在分叉下可能有淋巴结肿大。主支气管与血管、神经和淋巴管一起从肺门进入肺内。

(三) 支气管肺内分支

右主支气管在 2cm 处分出右上叶支气管，横径为 8~10mm，长轴与右主支气管轴夹角几近成直角，右上叶支气管在其外上方约 0.9cm 处又分为尖段支气管 (B₁)、后段支气管 (B₂) 和前段支气管 (B₃)；右主支气管向下成为中间支气管，长 0.8~2cm 由此分出中叶支气管，并再分为外侧段支气管 (B₄) 和内侧段支气管 (B₅)；中间支气管主干往下延伸即为下叶支气管，右下叶支气管再分为背段支气管 (B₆)、内基底段支气管 (B₇)、前基底段支气管 (B₈)、外基底段支气管 (B₉) 和后基底段支气管 (B₁₀)。

左主支气管在距离隆突大约 3cm 处分出上叶支气管，左上叶支气管较右上叶支气管长，开口部位较右侧低 2.5cm 左右，长度为 1.0~1.5cm 向前外侧方走行后分出上、下两支支气管，上支再分为尖后段支气管 (B₁₊₂) 和前段支气管 (B₃)，下支分出上舌段支气管 (B₄) 和下舌段支气管 (B₅)；左主支气管继续下行即为下叶支气管，左下叶支气管向后外侧方分出背段支气管 (B₆) 后，又分为前内基底段支气管 (B₇₊₈)、外基底段支气管 (B₉) 和后基底段支气管 (B₁₀)。

段支气管又分为亚段支气管，并再依次分支为细支气管、终末细支气管等，越分越细，直至肺泡。

(四) 传导性气道的组织结构

气管和支气管管壁的组织结构十分相似，均由黏膜、黏膜下层和外膜所构成。

黏膜主要由柱状纤毛上皮细胞组成，其间散在分布杯状细胞，两者的比例为 5:1。每个纤毛上皮细胞的顶端都有 200 根左右的纤毛与近百根的微绒毛，每根纤毛由两根长 $6 \sim 7 \mu\text{m}$ 的纤丝所构成，它们以 $22 \text{ 次}/\text{s}$ 的频率向喉部方向摆动。纤毛顶部为杯状细胞和黏液腺分泌形成的黏液毯，通过纤毛摆动以 $2.5 \sim 3.5 \text{ mm}/\text{min}$ 速度向上方移动，有效地将进入气道的绝大部分有害颗粒与病原体排出呼吸道。当气管插管或切开时，呼吸道的湿化功能受到影响，黏液毯与纤毛运动因干燥而受损。在正常情况下，杯状细胞每日分泌黏液 $10 \sim 100 \text{ ml}$ ，若予以直接刺激，则黏液分泌明显增多。在纤毛上皮细胞与杯状细胞下的间隙中散在不规则排列的基底细胞及中间细胞，由此形成假复层上皮组织。当纤毛上皮细胞、杯状细胞受损时，可通过黏膜上皮层的前体细胞——基底细胞和中间细胞分化、化生而加以补充。随着支气管向周围不断分支、变细，纤毛上皮细胞逐渐变得矮小，至细支气管时仅为一层纤毛细胞，杯状细胞已极少，基底细胞和中间细胞亦逐渐消失。而在气管分叉的隆突部及一些次级分叉部，鳞状上皮细胞代替了纤毛上皮细胞。

黏膜下层为一疏松的结缔组织层，它与固有膜之间无明显的分界线，其内含有丰富的黏液腺与浆液腺，腺体导管呈壶腹状，开口于管腔，从而将分泌物直接排向黏膜表面，分泌物的主要成分为酸性多糖和中性多糖，还含有球蛋白、白蛋白、抗体、溶酶体和转移因子等，因此具有一定的非特异性免疫功能。腺体分泌黏液受迷走神经支配，乙酰胆碱使黏液腺的分泌增多，抗胆碱药如阿托品则使黏液腺的分泌减少。支气管发生炎症时，腺泡增多，腺体增大，黏液的分泌明显增加。

外膜由透明软骨和肌纤维组织组成。气管软骨呈马蹄形，其缺口位于背侧，由平滑肌纤维束和结缔组织连接而成膜壁，平滑肌收缩时可使气管管径变小。4~5 级以下的小支气管，其软骨环由不规则的软骨片所代替；随着小支气管继续向外围延伸，软骨片逐渐减少，至细支气管时，管壁已不存在软骨，仅由一层呈螺旋形排列的平滑肌所包绕，故当平滑肌收缩时，细支气管变狭、变短。在细支气管的上皮中存在一种无纤毛而有浓染颗粒的细胞即克拉拉 (Clara) 细胞，它具有分泌功能。

第二节 肺和肺泡

一、肺

肺位于胸腔的纵隔两侧，是具有弹性的海绵状器官，右肺较左肺略大。肺的上端称肺尖，下端称肺底（近膈面），外侧端称肋面，内侧端称纵隔面。肺内侧的肺门与纵隔相依附，是支气管、肺动脉、肺静脉、神经和淋巴管进出的通道。脏层胸膜的斜裂将左肺分为上、下两叶，右肺除斜裂外又藉水平裂相隔成上、中、下三叶。肺叶依据支气管和血管分支再分为肺段，故右肺共 3 叶 10 个段，左肺为 2 叶 8 个段。每个肺段呈圆锥形，其锥尖均指向肺门，其底部则均朝向肺表面，两肺段之间由少量结缔组织相隔。肺小叶由细支气管以下分支与相应的肺组织所构成。每个肺泡管和与其相连的呼吸区域，包括肺泡囊、肺泡以及相伴行的血管、神经、淋巴管等，组成了初级小叶（或称原始小叶），其范围很小，即使有病变亦难以从 X 线片上有所显示。次级小叶则是由 30~50 个初级小叶所构成的、由结缔组织隔所包裹着的

最小型的肺组织。一个次级小叶由 3~5 个终末细支气管支配（即 3~5 个腺泡）呈一不规则的多面体 直径为 1~2.5cm。腺泡是由每个终末支气管支配的实质部分，其内有呼吸性细支气管、肺泡管和肺泡等 体积约 150mm³ 直径 1~6mm，系气体交换的场所。呼吸性细支气管平均有 3 级连续性分支，在其尾端又有平均 3 级系列性短肺泡管分支，而在肺泡管分支的尾端分布着约由 10 个肺泡所组成的囊状盲端——肺泡囊，肺泡囊实际上是一个肺泡集团。全肺约有 23 × 10⁶ 个肺泡管和肺泡囊。

二、肺泡

肺泡是气体交换的场所，肺泡的总数在成人约有 3 亿个 肺泡的直径约为 0.25mm 肺泡总面积达 40~80m²，是终末细支气管总横断面积 180cm² 的 2 000~4 000 倍，是气管面积 (2.5cm²) 的 16 万~32 万倍。

肺泡与肺泡囊、肺泡管或呼吸性细支气管相通。相邻的肺泡彼此之间紧密相连，其连接部即为肺泡壁或肺泡隔。在相邻的肺泡壁间有 0.010~0.015mm 的小孔，称为肺泡孔或科恩孔 (Kohn's pore)。小孔呈圆形、卵圆形或不规则裂隙状，有助于邻近肺泡的侧支通气，起到平衡或代偿作用。细支气管有直径为 0.02~0.03mm 的交通支 即 Lambert 管道 直接通达到邻近多数肺泡，为这些肺泡提供了侧支通气，在维持肺泡通气方面起着十分重要的作用。

肺泡内表面覆盖着一层上皮细胞，由 I 型和 II 型肺泡细胞所组成。I 型肺泡细胞主要为扁平细胞，其基底膜与邻近的毛细血管基底膜紧密结合、融为一体，成为气-血屏障 它允许肺泡腔内与毛细血管血流内的气体相交换，而血液等液体却不易从血管内进入肺泡腔。

I 型肺泡细胞的细胞数约为 II 型肺泡细胞的一半，却覆盖了肺泡总面积的 95%。II 型肺泡细胞覆盖肺泡总面积的 5% 它是 I 型肺泡细胞的前体细胞，主要功能是分泌肺泡表面活性物质——双棕榈磷酸酐胆碱等，这种物质能降低肺泡表面张力，维持肺泡的稳定性，从而防止肺泡在呼气末期塌陷。此外，还有肺泡巨噬细胞和 III 型肺泡细胞（又称刷细胞）。肺泡巨噬细胞是由血液内单核细胞迁移至肺泡间隔后演变而来，具有明显的吞噬、清除异物功能。

III 型肺泡细胞是极为少见的肺泡细胞，其功能目前尚未明确。

第三节 肺 血 管

呼吸系统的血液供应包括肺循环和支气管循环。肺循环由肺动脉干及其分支、毛细血管和肺静脉所组成。回心静脉血流经肺循环，在肺内进行气体交换，因此肺循环完成气体交换功能。支气管循环的支气管动、静脉起着营养肺、气道和胸膜的作用。肺循环、支气管循环之间有动脉-动脉和静脉-静脉吻合支互相交通，起着互相调节、互相平衡的重要作用。

一、肺循环的动脉和静脉

(一) 肺动脉

肺动脉起源于右心室动脉圆锥，肺动脉主干在主动脉弓下、气管分叉前分为左、右肺动脉。左肺动脉直径为 1.8~2.1cm，它在左上叶支气管上方行进；右肺动脉直径为 2.0~2.5cm，它在右上叶支气管的前下方行进。当左肺动脉分出上叶动脉、右肺动脉分出肺动脉前干后即为左、右中间动脉，中间动脉再分出舌叶或中叶动脉，即为基底动脉，分布到下叶基底部。

肺动脉和相应的支气管伴行并逐渐分支，越分越细，直至终末小动脉在呼吸性细支气管、肺泡管和肺泡囊壁层分派出极多分支而构成肺毛细血管网。

(二) 肺毛细血管网

肺泡间隔内毛细血管网由流入毛细血管和毛细血管网两部分所组成，流入毛细血管是指动、静脉之间的粗网，毛细血管网是在肺泡周围形成的细网，两者的面积非常巨大，非常有利于肺泡与血液之间的气体交换。毛细血管壁有肌纤丝分布，起着控制和调节毛细血管内血流量的作用。

(三) 肺静脉

肺静脉起自肺泡和胸膜毛细血管网的远端，逐渐汇聚成小静脉，在肺小叶间隔中引流，然后在左、右两侧肺门集成肺静脉，分别形成上、下静脉两支主干，最后注入左心房。

与体循环不同 肺动脉具有低压和低阻特性 且引流静脉血 肺静脉无瓣膜 不与肺动脉伴行，携带动脉血。

二、支气管循环的动脉和静脉

(一) 支气管动脉

支气管动脉的起始部位与支数常有变异，一般来说，左支气管动脉的两支往往由胸主动脉腹侧相当于气管分叉部位分出；右支气管动脉有 1~2 支 常起始于右第 3 肋间动脉，也可能从右锁骨下动脉、乳内动脉或左支气管动脉分出。

支气管动脉进入肺后伴随着支气管分支，直至终末细支气管的远端，构成毛细血管丛。其主要功能是供应呼吸性细支气管水平以上的肺组织的营养，而更远侧的肺小叶则由肺动脉支配血供、营养。

(二) 支气管动脉丛

支气管动脉在支气管壁外膜组织中形成滋养动脉丛，有些分支透过支气管壁的肌层组织进入黏膜下层，形成滋养黏膜的毛细血管丛，而由这一部分动脉丛返回至肌层外，就形成了支气管外膜的静脉毛细血管丛，并引流注入肺静脉。故在壁肌收缩时，由体循环供血的动脉丛仍能使血液进入肌层下的毛细血管丛，而压力较低的静脉血却受阻，不能回流至静脉丛，这很可能是造成哮喘患者发作时黏膜水肿、支气管狭窄的机制之一。

(三) 支气管静脉

支气管静脉有三组：一组是在呼吸性细支气管水平形成支气管静脉丛，进入肺静脉；一组是支气管和周围组织的静脉丛，联合形成支气管肺静脉，亦流向肺静脉，这两组经肺静脉注入左心房的血液占来自支气管动脉血液的 2/3；另一组是起自隆突和叶、段等支气管壁的静脉丛 构成了真正的支气管静脉 经奇静脉、半奇静脉或肋间静脉到达腔静脉 进而汇入右心房 这部分血液仅占 1/3。

第四节 胸 膜 腔

胸膜为一浆膜组织，由结缔组织上面覆盖一层鳞状上皮细胞所组成。胸膜有壁层与脏层之分。壁层胸膜被覆于胸廓内壁、膈上部和纵隔表面；脏层胸膜被覆于肺表面和叶间裂。壁层胸膜和脏层胸膜在相应的组织结构上反折，在肺门处会合围成一密闭的胸膜腔，并从肺

门向下延伸形成双层胸膜皱襞的肺韧带以固定肺脏。

深吸气时胸膜的顶端在锁骨上方 2.5cm 下界可抵达第 12 肋下缘。在胸膜腔底部，由肋胸膜与膈胸膜会合形成肋膈窦 这是 X 线片上观察少量胸腔积液的位置。脏层胸膜、壁层胸膜之间有少量浆液，起着润滑作用，减少相互摩擦。

在正常情况下，胸膜腔的压力低于大气压，呈负压状态。吸气时胸膜腔平均压力为 $-6\text{cmH}_2\text{O}$ 而在呼气时则为 $-2.5\text{cmH}_2\text{O}$ 。由于重力关系，胸膜腔内的负压自肺顶至肺底逐渐减小 相差约 $5\text{cmH}_2\text{O}$ 。胸膜腔的负压是维持正常呼吸的必要条件，胸膜与肺疾患以及机械通气时可使负压变为正压，压力的增加可影响静脉血回流至心脏，导致不良反应。

脏层胸膜的血液供应主要来自支气管动脉，还有一部分来自肺动脉分支；壁层胸膜的血供则主要由肋间动脉分支支配。

第五节 胸廓

胸廓由胸骨、肋骨、胸椎和肋间肌等所组成，呈一无尖顶的锥形体。胸廓内包含着肺、气管、支气管、心脏和纵隔等重要脏器。在正常人，胸廓左右径比前后径约大 $1/4$ 。严重肺气肿患者可由于肺过度膨胀而呈桶状胸。

胸骨位于胸廓前方正中位置，由胸骨柄、胸骨体和剑突三部分所组成。肋骨有 12 对，第 1~7 对在前方经肋软骨与胸骨连接，第 8~10 对肋骨由肋软骨在前方互相衔接形成肋弓，第 11、12 对肋骨称为浮肋，其前端游离于腹壁的肌组织内。肋骨与椎体、横突之间构成的双关节，使肋骨颈有较大的旋转度。肋间隙有肋间外肌、肋间内肌和肋间最内肌，在肋骨下缘沟内分布有肋间神经和血管。胸廓的底部是膈肌。因此，胸廓具有足够的坚硬度以保护胸内的重要脏器。胸廓还具有一定的活动性，它在神经的支配下可有规律地提动肋骨，同时使膈肌收缩和下降，从而扩大胸腔容积，增加胸膜腔负压，有利于肺的扩张，回心血量增加，维持正常的呼吸与循环功能。

浙江省中医院 骆仙芳