

# 呼吸力学

王 君 健 编 著

科 学 出 版 社

# 呼 吸 力 学

王君健 编著

科 学 出 版 社

1 9 8 8

## 内 容 简 介

呼吸力学是以工程学的观点和方法研究呼吸生理学中呼吸系统的力学问题。本书内容包括呼吸力学概论、呼吸力学中常用参量的测量、呼吸系统的静力学性质、气体在呼吸道中的流动与弥散、呼吸过程中的动力学特性、通气与血流的匹配等。全书着重从力学观点阐述有关的呼吸生理机制、呼吸系统致病机制及其早期诊断指标。内容丰富、实用。

可供大学的生物医学工程、医学、生理学专业的师生、研究生,以及有关专业的科技工作者及医学工作者参考。

2126/27

## 呼 吸 力 学

王君健 编著

责任编辑 马素卿

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

\*

1988年4月第一版 开本: 787×1092 1/32

1988年4月第一次印刷 印张4

印数: 0001—1,600 字数: 87,000

ISBN 7-03-000994-3/Q·19

定价: 1.45 元

## 前 言

呼吸力学是以工程学的观点和方法研究呼吸生理学中呼吸系统的力学问题。因此将它归属于呼吸生理学似乎更合适些。

研究呼吸系统的力学问题，是希望能有助于对呼吸生理和病理的了解，因此不能不考虑到主要读者的兴趣所在。

了解肺功能的基本途径，一是通过呼吸系统进行气流分析；一是通过循环系统进行血气分析。特别应该提到的是，在肺功能的检测手段中，呼吸量计不仅是常备的，而且也是最为便宜的。但我想我们不应该因为它身价不高而忽视它。实际上，相对于它的代价来说，它的作用无疑是最为有效的。因此特别编写了“呼气过程中的动力特性”这样一章，并在第2章§2.1中强调了对呼吸量计的使用。简便易行，少付代价，多得实效，这就是工程学的原则。

本书的基本内容曾作为生物医学工程专业的选修课讲授过，限于作者的水平，错误和不妥之处在所难免，深望读者予以批评指正。

在撰写过程中，曾得到上海医科大学崔祥瑛教授、美国圣地亚哥加利福尼亚大学 (San Diego) 颜荣次教授和南加利福尼亚大学 S. S. Sobin 教授的热情帮助，他们对本书提出了许多精辟的意见，提供了难得的资料，并且审阅了部分手稿。作者在此深表谢意。还应该感谢华中工学院生物工程系的胡道伟同志，书中的插图是他在百忙中抽暇绘制的。

# 目 录

|                       |    |
|-----------------------|----|
| 前言                    | i  |
| 第 1 章 概论              | 1  |
| §1.1 体外环境和体内需求        | 1  |
| §1.2 气体交换方式           | 5  |
| §1.3 提高气体交换效率的途径      | 7  |
| §1.4 呼吸过程中的阻力         | 11 |
| §1.5 气道管壁的结构          | 14 |
| §1.6 呼吸的动力            | 15 |
| 第 2 章 呼吸力学中常用参量的测量    | 18 |
| §2.1 容积的测量            | 18 |
| §2.2 流量的测量            | 31 |
| §2.3 压力的测量            | 32 |
| 第 3 章 呼吸系统的静力学性质      | 35 |
| §3.1 离体肺的静力学性质        | 35 |
| §3.2 离体肺的应力、应变关系      | 43 |
| §3.3 肺泡隔膜与应变、应力的关系    | 46 |
| §3.4 整体——肺和胸廓系统的静力学性质 | 54 |
| §3.5 肺本体的稳定性          | 56 |
| §3.6 肺在胸腔中是如何平衡的      | 59 |
| 第 4 章 气体在呼吸道中的流动与弥散   | 62 |
| §4.1 气道的结构            | 62 |
| §4.2 气体在管系中的流动        | 74 |
| §4.3 气体在气道中的弥散        | 81 |
| §4.4 高频通气的传输机理        | 87 |
| 第 5 章 呼气过程中的动力特性      | 93 |

|              |                       |            |
|--------------|-----------------------|------------|
| §5.1         | 强力呼气过程中的容积-时间曲线 ..... | 93         |
| §5.2         | 限速现象及等容压力-流量曲线 .....  | 96         |
| §5.3         | 可塌陷管中的流动及等压点理论 .....  | 98         |
| §5.4         | 可变形管的节流理论 .....       | 102        |
| §5.5         | 流量-容积曲线 .....         | 105        |
| <b>第 6 章</b> | <b>通气与血流的匹配 .....</b> | <b>110</b> |
| §6.1         | 通气的非均匀现象 .....        | 110        |
| §6.2         | 血流的非均匀现象 .....        | 113        |
| §6.3         | 通气与血流的关系 .....        | 116        |

# 第 1 章 概 论

肺的主要功能,是进行气体交换.具体说来,就是按照生理的需要,一方面将一定量的氧输向混合静脉血,一方面又从混合静脉血中排走多余的二氧化碳.这两种功能是同等重要的.没有氧的输入,固然不能进行有氧代谢,但不能排除多余的二氧化碳,也会影响代谢的正常活动,甚而危及生命.

## §1.1 体外环境和体内需求

若是要求我们设计这样一种气体交换装置,我们应该如何着手呢?毫无疑问,首先要考虑的是摄入氧和排出二氧化碳的体外环境,以及体内代谢的需要.

### 体外环境

通常摄入的氧来源于我们生活的大气环境,体内多余的二氧化碳,也是排向大气环境,因此要分析大气环境的化学、物理条件.大气是由多种气体组成的,其中占主要成分的有  $N_2$  和  $O_2$ , 还有  $CO_2$ 、水蒸气等.在干燥的空气中,其组分分别为  $F_{N_2} = 79.03\%$ ,  $F_{O_2} = 20.93\%$ ,  $F_{CO_2} = 0.04\%$ ,  $F_{H_2O} = 0$ . 现举例说明气体组分的含义.若有三个容器(见图 1.1),容器的容积分别为 790.3ml, 209.3ml 和 0.4ml.我们分别用  $N_2$ 、

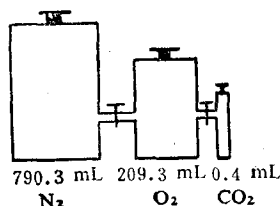


图 1.1 混合气体组分的分压说明图.

$O_2$  和  $CO_2$  (还有微量的稀有气体) 充入三个容器, 使三个容器中的气压都达到一个大气压, 温度则保持为室温。此后将三个容器连通, 由于各容器中的气压原来都是一个大气压, 故连通后各容器中的气压不变。但是容器中气体的组分变了, 成为混合的气体。其容积总共为 1 L, 其组分为  $F_{N_2} = 79.03\%$ ,  $F_{O_2} = 20.93\%$ ,  $F_{CO_2} = 0.04$ ,  $F_{H_2O} = 0$ 。这正与干燥大气的成分相近。

由此我们可以引出以后经常要用到的一个重要概念——气体的分压。若三个容器中, 只对一个容器充气, 譬如说, 用  $N_2$  对第一个容器充气至一个大气压, 而保留另外的两个容器为真空。然后将三个容器连通, 此时  $N_2$  会从第一个容器流向其余两个容器, 直至三个容器中的气压相同。显然, 由于  $N_2$  占有的空间比原来的大, 压力就会比原来的压力低。我们将这个压力值称为  $N_2$  在大气中的分压。据此, 气体分压的定义是: 各组分气体在混合气体总容积中单独存在时所产生的压力, 一般记为  $p_K$ 。附标  $K$  用以指明是对气体  $K$  而言的。

现在我们来讨论混合气体的压力与各组分气体分压的关系。对于气体而言, 压力  $p$ 、容积  $V$ 、温度  $T$  和质量  $n$  (摩尔数) 之间有如下的关系:

$$pV = nRT$$

式中,  $R = 8.2 \text{ L} \cdot \text{kPa} / \text{mol} \cdot \text{K}$  为气体常数。

设混合气体的压力为  $p_0$ , 总容积为  $V_0$ , 在等温情况下, 对于某组分气体  $i$  而言, 根据分压的定义,  $p_i$  是  $n = n_i$ ,  $V = V_0$  时的压力值。故有

$$p_i V_0 = n_i RT$$

当  $p = p_0$  时,

$$p_0 V_0 = n_i RT$$



又按前述定义有  $F_i = V_i/V_0$ 。由于

$$p_i V_0 = p_0 V_i,$$

故由

$$p_i = p_0 \frac{V_i}{V_0} = p_0 F_i$$

若各组分相加,且由于  $\Sigma F_i = 1$ , 故有

$$p_0 = \Sigma p_i.$$

上式说明: 混合气体的压力等于各组分气体分压的总和, 这就是 Dalton 的气体分压定律。据此大气中各组分气体的分压值如表 1.1 所示。

表 1.1 大气中各组分气体的分压值

|              | 干 燥 空 气 | 气道内空气(37℃) |
|--------------|---------|------------|
| $p_{O_2}$    | 21 kPa  | 20 kPa     |
| $p_{CO_2}$   | 0.04    | 0.04       |
| $p_{H_2O}$   | 0       | 6.25       |
| $p_{N_2}$    | 79      | 73.7       |
| $p_{\Sigma}$ | 100 kPa | 100 kPa    |

大气的化学、物理条件,随地区、气候、环境等因素而有差异。例如我们取为标准的海平面处的大气压平均为  $1.013 \times 10^2 \text{kPa}$  (或近似取为  $1 \times 10^2 \text{kPa}$ )。而高海拔地区的气压就低于这个标准大气压值。在地表面直至 100km 的高空,大气中气体的组分基本恒定。但是,在有严重污染的工业地区,大气中的组分就会渗有其他气体,如  $\text{SO}_2$  等。大气中水蒸气的含量则与湿度和温度有关。对于湿化的气体,例如当空气通过鼻、咽、喉进入气管前,空气受到腔面粘膜的湿化和加温,变成了含饱和水蒸气的空气。当空气与体温一致,同为  $37^\circ\text{C}$  时,水蒸气的分压为  $6.25 \text{kPa}$  (习惯取近似值  $6 \text{kPa}$ ) ,相当于

47mmHg<sup>1)</sup>。由于有水蒸气加入，冲淡了  $N_2, O_2, CO_2$  在大气中占有的组分，故大气的总压力此时虽然仍为一个大气压，但其组成除  $N_2, O_2, CO_2$  的分压外，还应加入水蒸气的分压。故有

$$p_{N_2} + p_{O_2} + p_{CO_2} + p_{H_2O} = 10^2 \text{ kPa (760 mmHg)}$$

而  $N_2, O_2$  和  $CO_2$  的分压和则应为

$$p_{N_2} + p_{O_2} + p_{CO_2} = 10^2 - 6.25 = 93.75 \approx 94 \text{ kPa.}$$

此时各气体的分压值可见表 1.1.

### 体内需求

体内对  $O_2$  的需要量和  $CO_2$  的排出量与代谢有关，其变动范围很大。例如在从事剧烈运动和重体力劳动时，所需的  $O_2$  量比静息状态时的可增大 10~20 倍。其他如摄入的饮食成分等因素也与之有关。

在静息状态下，一般成年人每分钟约需消耗氧 250ml (在体温为 37°C 时换算为 284ml)，与此同时排出二氧化碳约 200ml (经体温因素校正为 227ml)。若每次平均吸入的气量为 500ml，则由前述可知其中  $O_2$  的含量为  $500 \times 0.2093 = 104.6 \text{ ml}$ ；在呼出的气体中， $O_2$  的含量仍有 78.6ml，故完成一次呼吸，实际供氧量约为  $104.6 - 78.5 \approx 26 \text{ ml}$ 。同理在完成一次呼吸时，排出的二氧化碳量约为 17.7ml。据此，约需进行 12 次呼吸每分钟才能保证静息状态时的需要。这正与实际的情况相符。在此应该指出，上述的估算是以静息状态而言的。在日常生活中，对  $O_2$  的需要量要大些，有时会成几倍、十倍地增加，对于这种情况，解决的途径之一是增加每次的呼吸气量和呼吸频率。

---

1) 1mmHg = 133.322 Pa.

## §1.2 气体交换方式

在分析了体外和体内的供求条件以后，我们就应该考虑采用什么方式进行供气和排气，即如何在外界与血液间进行气体交换。自然界中最简单的气体输运方式是流动与弥散。由于血液不能直接暴露于外环境，所以大气要与它交换气体，只能采用隔膜的方式进行。这就是说，只能采用以隔膜弥散的方式来进行气体交换。

气体由分子所组成，处于持续的随机运动状态。当一个容器中气体的密度不是均匀的时候，高密度区的气体会向低密度区弥散，直至整个容器中气体的密度均匀一致。因此弥散发生是由于气体密度存在着梯度所致。由于气体的压力与密度成正比，因此弥散也就与压力梯度有关。

当气体与液体在气体-液体交界面上相互接触时，气体中的一些分子由于随机热运动，会进入液体而溶于其中，与此同时，也会有些在液体中的气体分子自其中逸出，返回到液外的气体中去。当气体进入液体的分子数和离开液面进入气体的分子数相等时，这个过程处于平衡状态。此时我们称气体在液体内产生的分压与液外气体的压力相等。

### Henry 定律

气体溶于液体中的气量，与作用于液面上的压力有关，其关系遵从 Henry 定律：

$$c = sp$$

式中， $c$  是气体在单位容积液体中的溶解量， $p$  为气体的压力， $s$  称为溶解系数。应该指出的是：Henry 定律对于能与液体发生化学反应的气体不适用。它只是表示因压力而产生

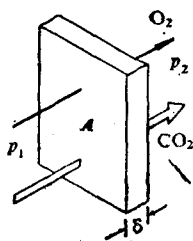
的物理溶解量。从式中可以看出,气体的溶解量,不仅与压力有关,而且还与溶解系数有关。有的气体易溶于某种液体,即使在气体分压力不高时,液体中气体的含量也可以较高;有的气体,不易溶于某种液体,因而即使气体在液体中的分压很高,气体在其中的含量也很低。有关气体在液体中的物理溶解数据,列于表1.2中。从表中看出:对于水来说,CO<sub>2</sub>比O<sub>2</sub>的物理溶解度大约高24倍;对于血浆和全血来说,CO<sub>2</sub>比O<sub>2</sub>的物理溶解度分别大24倍和20倍。

表1.2 气体在液体中的物理溶度(37℃)ml/100ml-atm

|                 | 水     | 血 浆  | 全 血  |
|-----------------|-------|------|------|
| O <sub>2</sub>  | 2.886 | 2.14 | 2.36 |
| CO <sub>2</sub> | 56.7  | 51.5 | 48   |
| N <sub>2</sub>  | 1.23  | 1.18 | 1.8  |

综上所述,我们已经明确了呼吸器官的主要问题是要求以隔膜弥散的方式,能在不同的条件下具有足够的气体交换能力,满足代谢的需要。至于体外环境的条件,一般只能看作是强制性的因素。

### 隔膜弥散——Fick 弥散定律



气体透过生物膜的弥散率,即单位时间通过膜的气体容积,与膜的气体交换面积成正比,与膜两侧的有关气体分压差成正比,与膜的厚度成反比,这个称为 Fick 弥散定律的表达式,可写为

$$\dot{V} = D \frac{A}{\delta} (p_1 - p_2)$$

图1.2 气体隔膜的弥散。式中, $\dot{V}$ 为弥散率, $A$ 为膜的气体交换面

1) Fick 定律原是用浓度差,但这里用分压差表示要方便些。

积,  $\delta$  为膜的厚度,  $p_1, p_2$  分别为膜两侧有关气体的分压,  $D$  称为弥散系数, 它与溶解系数  $s$  成正比, 与气体的分子量的平方根成反比。对于  $O_2$  和  $CO_2$  而言,  $O_2$  的分子量为 32,  $CO_2$  的分子量为 44, 因此就分子量来说,  $O_2$  比  $CO_2$  要弥散得快  $\sqrt{44/32} = 1.17$  倍。但根据前面所述关于气体在液体中的溶解系数  $s$ ,  $CO_2$  比  $O_2$  的溶解系数要大 24 倍, 故在隔膜进行气血间弥散交换时, 总的效果是  $CO_2$  比  $O_2$  的弥散率要大 20 倍左右。

### §1.3 提高气体交换效率的途径

以弥散的方式进行气体交换, 虽然是自然界最简单的一种方式, 但效率不高, 往往难以满足代谢的需要。可以证明, 若一个球状的单细胞生物只是单纯地通过细胞膜以弥散方式与外环境进行物质交换, 生物个体的体积只能在很小的情况下才有可能维持其生存。对于呼吸器官而言, 要满足代谢的需要, 也必须设法提高气体交换的效率。途径是改良工作介质和结构。

#### 工作介质的改进

血液在气体交换过程中是作为载运气体的一种工作介质。我们知道, 单纯依靠  $O_2$  分压来提高血液中的  $O_2$  的物理溶解量, 效率是很低的。由表 1.2 中可知, 在  $37^\circ C$  时, 对于 1ml 的血, 在  $O_2$  分压每增加 1kPa 时,  $O_2$  的溶解量增加值为

$$\frac{2.36}{100 \times 10^2} = 2.36 \times 10^{-4} \text{ml}$$

若动脉血的  $O_2$  分压值为 13.3kPa(100mmHg), 静脉血的  $O_2$

分压值为  $5.3\text{kPa}(40\text{mmHg})$ ，则每毫升血液以物理溶解的方式能供的  $\text{O}_2$  为

$$2.36 \times 10^{-4} \times (13.3 - 5.3) = 1.9 \times 10^{-3} \text{ml/ml}$$

在静息状态，约需耗氧  $250\text{ml}$  每分钟，故血流量应为  $250/1.9 = 130\text{L/min}$ 。但实际上，静息状态下的心输出量只有  $5\text{L/min}$  左右。之所以能以这样低的心输出量保证  $\text{O}_2$  的供应，原因在于血液中有血红蛋白这种物质，使得工作介质的载  $\text{O}_2$  能力大大提高所致。

对于  $\text{CO}_2$  而言，尽管它比  $\text{O}_2$  的物理溶解度大 24 倍左右，但也存在着同样的问题，只是由于改良了工作介质，加入血红蛋白，才使血液的载运能力提高了近 20 倍。有关数据可见表 1.3。

表 1.3 成年健康人动静脉血中气体的平均容积和分压值

|                      | 动 脉 血                            | 静 脉 血                          |
|----------------------|----------------------------------|--------------------------------|
| $\text{O}_2$ 分压      | $13.3\text{kPa}(100\text{mmHg})$ | $5.3\text{kPa}(40\text{mmHg})$ |
| $\text{O}_2$ 在血中溶解量  | $0.3\text{ml}/100\text{ml}$      | $0.12\text{ml}/100\text{ml}$   |
| $\text{O}_2$ 在血中总含量  | $20.3\text{ml}/100\text{ml}$     | $15.32\text{ml}/100\text{ml}$  |
| $\text{CO}_2$ 分压     | $5.3\text{kPa}(40\text{mmHg})$   | $6.1\text{kPa}(46\text{mmHg})$ |
| $\text{CO}_2$ 在血中溶解量 | $2.69\text{ml}/100\text{ml}$     | $3.09\text{ml}/100\text{ml}$   |
| $\text{CO}_2$ 在血中总含量 | $49.02\text{ml}/100\text{ml}$    | $53.0\text{ml}/100\text{ml}$   |

### 增加气体交换面积

根据 Fick 定律，增加气体交换面积  $A$  可以提高气体交换的效率。气体交换装置所占有的空间，其大小是有一定限制的，譬如说，限制在一个  $6\text{L}$  的空间。为讨论方便计，若设这个空间是球状的，则它的半径为  $11.4\text{cm}$ ，而表面积为  $0.16\text{m}^2$ 。要想对这个一定大小的空间增加与外界接触的表面积，最简单的办法就是在内空间加上隔板，隔成许多小间，并

使隔成的各个小间与外界相通。例如在这个球状的空间的子午面上加一隔板,并使这样隔成的两个小间相通,则表面积就由原来的  $8\pi R^2$  增大到  $8\pi R^2 + 2\pi R^2$  了,即较原来的表面积大了25%。我们的肺就是以这种方式增大气体交换面积的。它用肺泡隔膜将肺空间约分隔成  $3 \times 10^8$  个通向外界的小单元,这些小单元的特征尺寸约为  $0.3\text{mm}$ , 表面积则增加到了  $10^2\text{m}^2$  左右,即大约较不加隔膜的情形增大了三个数量级。

### 减小肺泡隔膜的厚度

若是减小 Fick 定律中膜厚度  $\delta$ , 对于空气与血液间进行  $\text{O}_2$  和  $\text{CO}_2$  的交换,无疑是很有利的。实际的结构是将运输血液的毛细血管夹在小单元的隔膜中,好象家用自来水管和煤气管道嵌在房间的墙壁中那样。肺泡隔膜的两面均暴露于气体中(图1.3)。由于肺泡隔膜中夹有毛细血管,所以肺泡隔膜的厚度不会小于毛细血管的管径;另一方面,毛细血管中有红细胞等有形成分通过其间,它的管径至少应与红细胞的直径相当,这样才能允许红细胞通过其间。红细胞的平均直径在  $6 \sim 8\mu\text{m}$  左右,故肺泡隔膜的厚度至少应为  $10\mu\text{m}$  左右。实际上,肺泡隔膜尽管由含活性物质的液层、扁平上皮细胞层、基膜、间质层、基膜和毛细血管的内皮细胞所构成,但总起来,其厚度还不到  $1\mu\text{m}$ ,最薄处可至  $0.2\mu\text{m}$ ,平均为  $0.5\mu\text{m}$ ,加上毛细血管的管径宽度,其总厚约为  $10\mu\text{m}$ 。

综上所述,我们可以看出:当肺内微血管床所容血量一

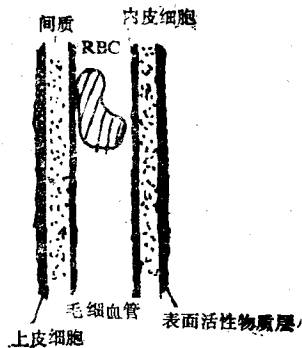


图 1.3 肺泡隔膜结构示意图。

般为 100ml 时, 若将这样少量的血平铺在面积为  $100\text{m}^2$  (可以和球场面积相比) 的膜面上, 而血液与空气相隔的膜壁又只有不到  $1\mu\text{m}$  的厚度, 在这样的条件下, 气体与血液交换  $\text{O}_2$  和  $\text{CO}_2$  时, 一定是十分有效的。

### 起连通作用的管路系统

上面讲到, 为了增加气体交换面积, 用隔膜在空间内隔出约  $3 \times 10^8$  个小单元空间。这些单元必须要求与外界相通才能进气、排气。因而需要有一套管路系统将各单元与外界连通起来。这就是呼吸道。它的功能既然是在各单元与外环境之间传输气体, 这就要求这套管路: 一是根据各局部对供气和排气的需要来安排管系的布局; 二是当空气在其中流动时阻力要小; 三是管路系统不能过多地占有空间, 因为对于一定大小的空间, 若是作为传输气体的管系所占有的空间过大, 就必然会相应地减小能交换气体的空间部分。反之若是管路的管径过细, 要保证一定的气体流量流过, 也必然会增大能量的消耗。另外, 由于这套管路系统——呼吸道是与外界相通的, 因此必须有过滤的设施, 以排除有害或无益的异物进入体内。其他如对空气的预热和湿化, 也都是必要的。

整个管道系统——呼吸道的结构, 一般分为上呼吸道和下呼吸道。上呼吸道包括鼻、咽、喉、下呼吸道则包括气管和支气管系。从气管开始, 气管系按一分为二的方式逐级分支, 形成树状的气管系。各分支管管道的管径和长度也逐级变细变短<sup>1)</sup>。若以气管为 0 级, 主支气管为 1 级, 依级编号, 大约至第 16 级前后, 管壁开始出现肺泡, 由此以下, 管道不只是单

---

1) 一般的说法是气管树的管道呈锥状。但 S.Sobin 教授指出, 各管段本身的管径是相同的, 呈柱状(S.Sobin 教授私人通信, 1985)。



纯地起输运气体——通气的作用，而是兼有在管壁处与血液进行  $O_2$  和  $CO_2$  交换的功能。因此从第 0 级的气管到第 16 级支气管，从功能上说起着输运气体——通气的作用，我们称之为下呼吸道。由于呼吸道（包括上、下呼吸道）不具有气体交换的功能（相对于血液而言），故被称为无效腔或死腔，成年人的约为 150 ml。由第 17 级的细支气管起，开始在管壁上出现肺泡，经逐级分支，结构上逐渐过渡到肺泡管，而终止于肺泡单元区（盲端），其详细几何结构，将在第 3 章中说明。从第 17 级至肺泡区，由于兼有气体输运和气体交换的功能，我们称之为呼吸区。由第 17 级至肺泡区，平均距离一般不超过 5mm，但呼吸区所占有的空间大小超过 3000ml，而无效腔或死腔，作为通气的管道系统只占有 150ml 左右，由此可以看出，管系的结构设计能保证气体交换占有绝大部分的空间。

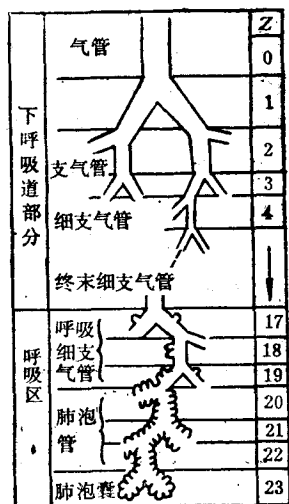


图 1.4 Weibel 的气道系统模型。

$Z$ ——分支的级数。0 至 16 级支气管只具有通气作用，称为下呼吸道；17 级至肺泡囊具有气-血间气体交换功能，称为呼吸区。

## §1.4 呼吸过程中的阻力

在呼吸过程中，器官的阻力，并由此而消耗的功主要来自两个方面。一是由于肺组织具有粘弹性性质，以及肺泡隔膜上的粘液的作用，随着肺容积的扩张和收缩，需要消耗一部分