

科學圖書大庫

呼吸生理精要

譯者 蔣台舟

徐氏基金會出版

科學圖書大庫

呼吸生理精要

譯者 蔣台舟

徐氏基金會出版

我們的工作目標

文明的進度，因素很多，而科學居其首。科學知識與技術的傳播，是提高工業生產、改善生活環境的主動力。在整個社會長期發展上，乃對人類未來世代的投資。從事科學研究與科學教育者，自應各就專長，竭智盡力，發揮偉大功能，共使科學飛躍進展，同將人類的生活，帶進更幸福、更完善之境界。

近三十年來，科學急遽發展之收穫，已超越以往多年累積之成果。昔之認為若幻想者，今多已成爲事實。人類一再親履月球，是各種科學綜合建樹與科學家精誠合作的貢獻，誠令人無限興奮！時代日新又新，如何推動科學教育，有效造就科學人才，促進科學研究與發展，尤爲社會、國家的基本使命。培養人才，起自中學階段，此時學生對基礎科學，如物理、數學、生物、化學，已有接觸。及至大專院校專科教育開始後，則有賴於師資與圖書的指導啓發，始能爲蔚爲大器。而從事科學研究與科學教育的學者，志在貢獻研究成果與啓導後學，旨趣崇高，彌足欽佩！

本基金會係由徐銘信氏捐資創辦；旨在協助國家發展科學知識與技術，促進民生樂利，民國四十五年四月成立於美國紐約。初由旅美學人胡適博士、程其保博士等，甄選國內大學理工科優秀畢業生出國深造，前後達四十人，惜學成返國服務者十不得一。另曾贈送國內數所大學儀器設備，輔助教學，尚有微效；然審情度理，仍嫌未能普及，遂再邀請國內外權威學者，設置科學圖書編譯委員會，主持「科學圖書大庫」編譯事宜。以主任委員徐銘信氏爲監修人，編譯委員林碧鏗氏爲編輯人，各編譯委員擔任分組審查及校閱工作。「科學圖書大庫」首期擬定二千種，凡四億言。門分類別，細大不捐；分爲叢書，合則大庫。爲欲達成此一目標，除編譯委員外，本會另聘從事

Wt 508/16

翻譯之學者五百餘位，於英、德、法、日文出版物中精選最近出版之基本或實用科技名著，譯成中文，供給各級學校在校學生及社會大眾閱讀，內容嚴求深入淺出，圖文並茂。幸賴各學科之專家學者，於公私兩忙中，慨然撥冗贊助，譯著圖書，感人至深。其旅居國外者，亦有感於為國人譯著，助益青年求知，遠勝於短期返國講學，遂不計稿酬多寡，費時又多，迢迢乎千萬里，書稿郵航交遞，其報國熱忱，思源固本，至足欽仰！

今科學圖書大庫已出版一千餘種，都二億八千餘萬言；尚在排印中者，約數百種，本會自當依照原訂目標，廣續進行，以達成科學報國之宏願。

本會出版之書籍，除質量並重外，並致力於時效之爭取，舉凡國外科學名著，初版發行半年之內，本會即擬參酌國內需要，選擇一部份譯成中文本發行，惟欲實現此目標，端賴各方面之大力贊助，始克有濟。

茲特拋誠呼籲：

自由中國大專院校之教授，研究機構之專家、學者，與從事工業建設之工程師；

旅居海外從事教育與研究之學人、留學生；

大專院校及研究機構退休之教授、專家、學者

主動地精選最新、最佳外文科學名著，或個別參與譯校，或就多年研究成果，分科撰著成書，公之於世。本基金會自當運用基金，並藉優良出版系統，善任傳播科學種子之媒介。尚祈各界專家學人，共襄盛舉是禱！

徐氏基金會 敬啟

中華民國六十四年九月

原 序

本書原是為醫學生一門主課所寫，以美國加州聖地牙哥大學醫學院所上的課為基礎。於今，瞭解肺如何發揮功能，對於肺疾患者的處理愈形重要，所以希望此一簡單的著述，對實習醫生，麻醉醫師，與醫務人員也能有所助益。

若本書有何偏重，乃是因為肺專司氣體交換，這於第一章及其後幾章有所敘述。對於此項的強調，我不做任何辯護，於傳統上，肺功能之氣體交換，很少為人注意，這實在是令人吃驚。其他方面，如通氣的管制，往往過份為人注意，於本書盡量使之平衡。肺生理於測定肺功能的應用，雖然不是中心課題的一部份，但在本書最後一章略有敘述。

此書的參考資料，廣泛地採自其他人的研究節述。參考資料中並不包括個人的文章，但列了另外應讀的題目、為了幫助教學之用，本書有許多圖，另外還有一組錄音帶及幻灯片。

有幾位同事讀過部份或全部的手稿，提出許多改進的建議，他們是 Drs D.D. Fanestil, Y.C. Fung, S.Lahiri, P.T.Macklem, S. Permutt 與 P.D.Wagner 等人，於此向他們深致謝忱。當然任何缺點均為我的責任，非常歡迎讀者建議設性的批評。

遺憾的是，有很多呼吸生理有趣的地方，不能統統言及。我唯一的慰藉是，對於那些負擔太重的同學及繁忙的醫師來說，將會體諒本書的簡潔與討論題目的有限，也希望能因此鼓勵一些同學讀得更廣，找出一些有趣的相關範圍來研究，如此較呼吸生理學。

John B. West, M.D. Ph.D.

目 錄

原 序	1
第一章 構造與功能	
肺的結構如何助益其功能·····	1
第二章 通 氣	
氣體如何進入肺泡·····	10
第三章 擴散作用	
氣體如何穿過肺泡壁·····	17
第四章 血液循環	
血液如何從肺運走氣體·····	24
第五章 通氣—灌注之關係	
氣體與血液如何配合行氣體交換·····	37
第六章 氣體到周邊組織的運輸	
氣體如何運輸到周邊組織·····	52
第七章 呼吸的機械原理	
肺的支撐與運動·····	66
第八章 通氣的管制	
氣體交換如何調節·····	86

第九章 特殊環境下的呼吸生理

高低壓力下與出生時的氣體交換.....	96
---------------------	----

第十章 肺功能的測定

如何應用呼吸生理學來測定肺功能.....	108
----------------------	-----

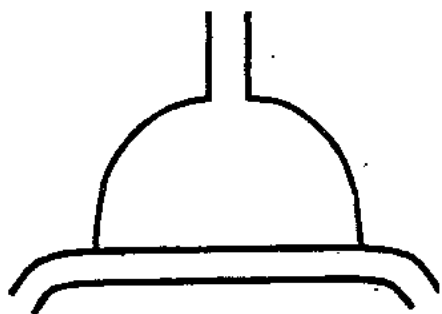
附 錄—符號與公式	121
------------------------	-----

題 目	126
------------------	-----

答 案	132
------------------	-----

參考讀物	136
-------------------	-----

索 引	140
------------------	-----



第一章 構造與功能

(Structure and Function)

肺的結構如何助益其功能

(how the architecture of the lung subserves its purpose)

肺臟行氣體交換，主要的功能是由空氣中吸入氧 O_2 ，並將呼出二氧化碳 CO_2 。肺也有其他的功能；如把循環中的有毒物質過濾掉，某些化合物的代謝及血液的儲存。但它的主要功能是行氣體交換，我們就從血液與氣體接觸的地方談起。

血液—氣體接觸面 (Blood-Gas Interface)

O_2 與 CO_2 在空氣與血液之間的移行，是靠簡單的擴散作用 (Diffusion)，就是由氣體分壓高的地方移到分壓低的地方 (註)，就像水往低處流一樣。Fick 氏擴散定律 (Fick's law of diffusion) 說明氣體通過組織的量，與組織的表面積成正比，與其厚度成反比。而血液—氣體障壁是非常的薄 (薄)，其表面積在 50 到 100 平方公尺之間，因此它非常適合行氣體交換。

(註) 氣體分壓是濃度與總壓力的乘積。例如 20.93% O_2 在海平面 $P_{O_2} = 20.93 / 100 \times 760 = 159 \text{ mmHg}$ ，肺內水蒸汽分壓是 47 mmHg，總壓力為 760 - 47 = 713 mmHg。吸入之 O_2 分壓為 $713 \times 20.93 / 100 = 149 \text{ mmHg}$)

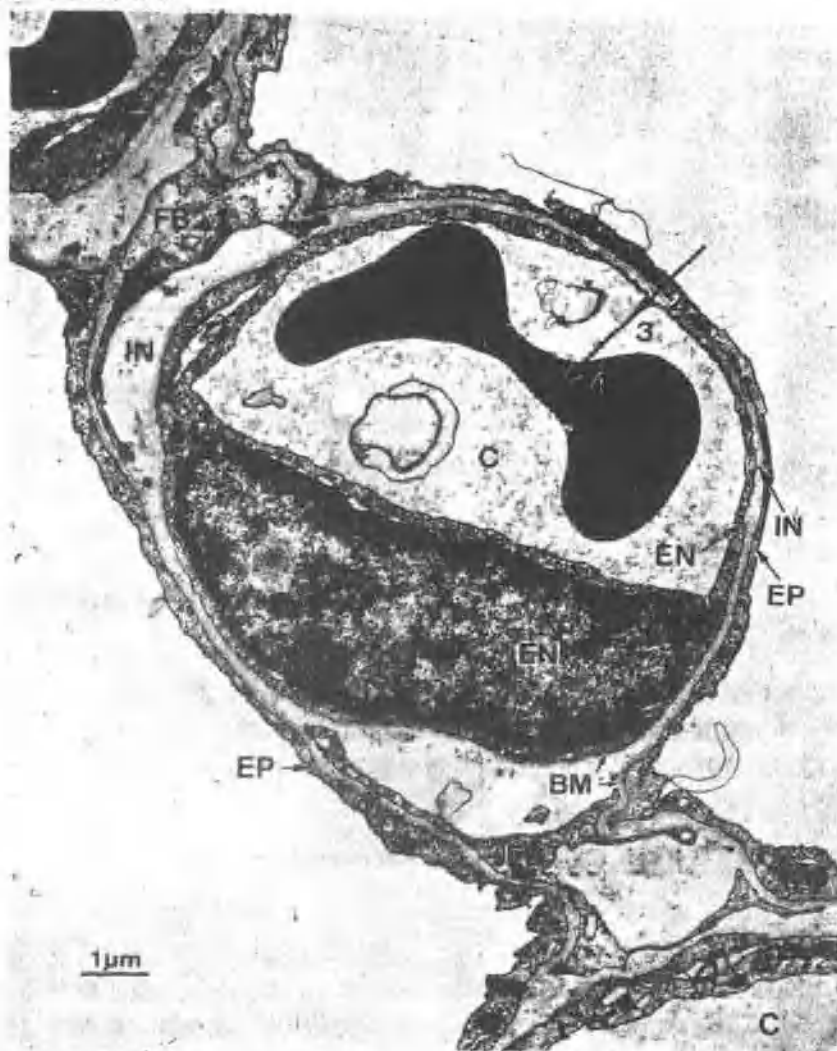


圖 1. 電子顯微鏡下肺泡上的微血管 (C)。血液氣體障壁小於 0.5 microns。箭頭所指為肺泡氣體進入紅血球 EC 的途徑。肺泡上皮 EP，間質 IN，微血管內皮 EN 與血漿。纖維母細胞 FB 之部份。基膜 BM 與內皮細胞的核也可見。

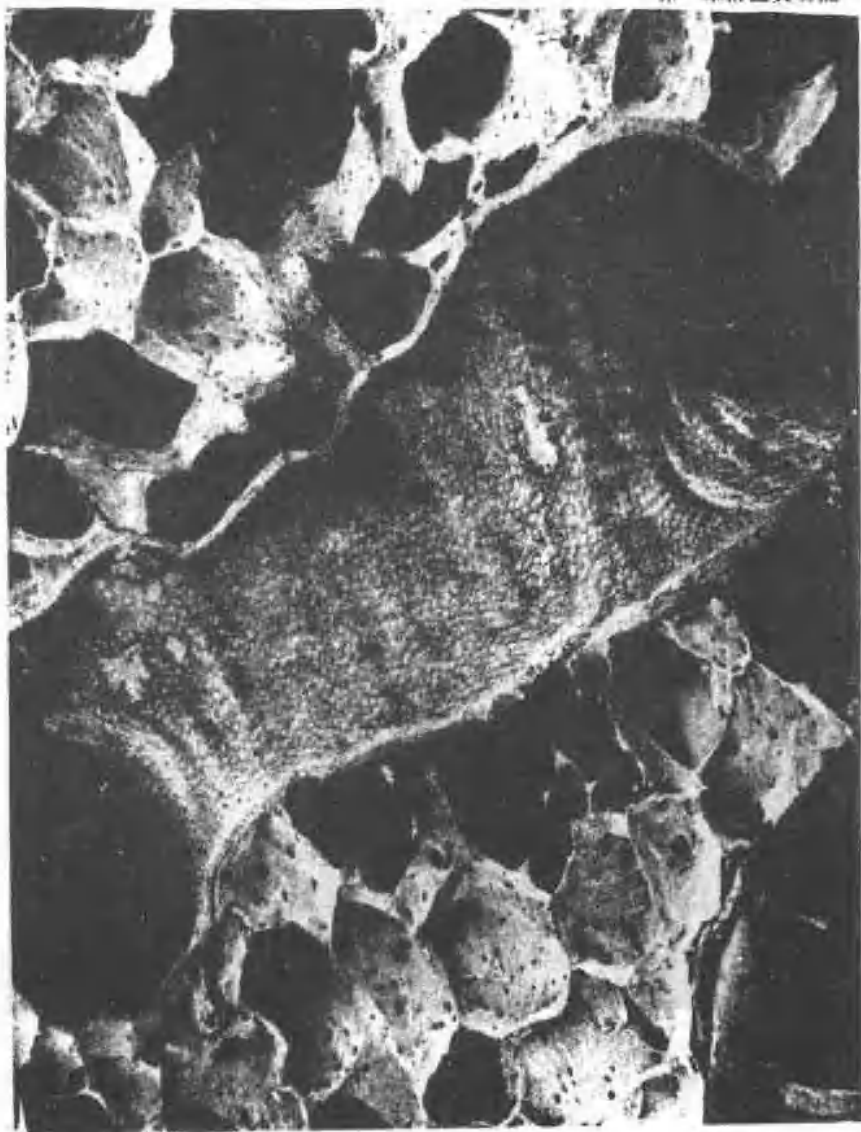


圖 2 肺的切面顯示很多肺泡與小氣管枝。肺泡壁上佈着微血管，並有 Kohn 孔。

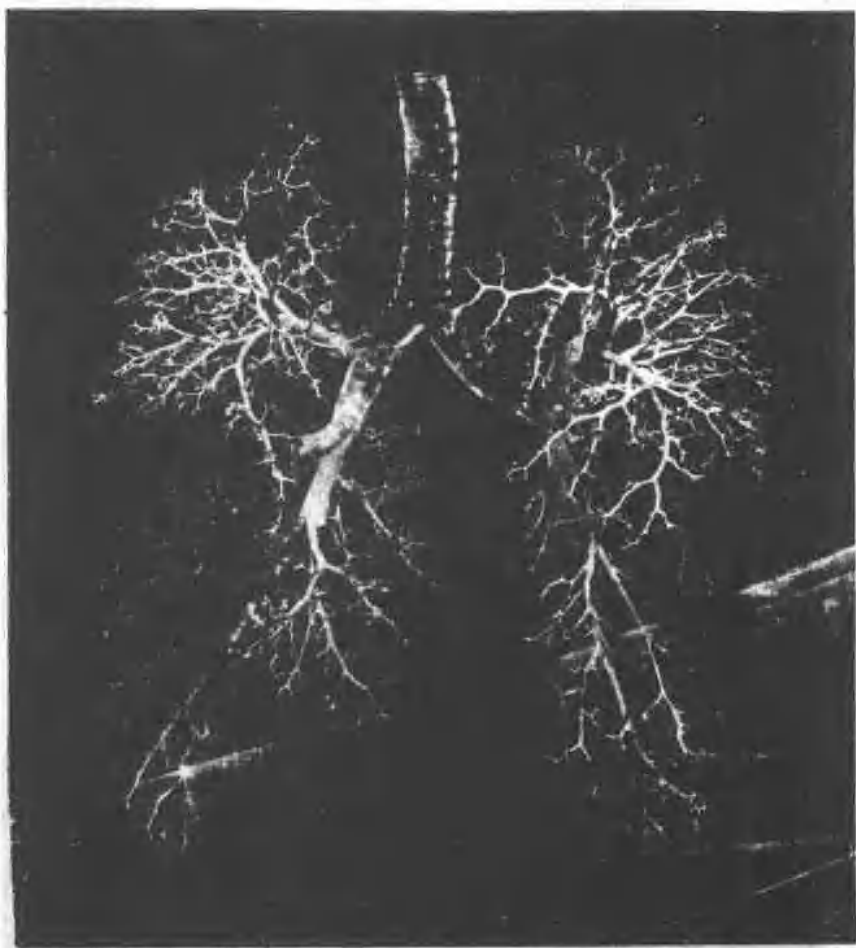


圖 3 人肺臟呼吸道的模型。省略了肺泡，氣體到終末小支氣管均可見。

在有限的胸腔內，怎麼可能有如此龐大的表面積來行擴散作用呢？微血管（Capillaries）包圍著無數的小氣囊稱之為肺泡（Alveoli）（圖2），人的肺大約有三億（ 3×10^8 ）個肺泡，每個直徑大約有 $\frac{1}{3}$ 毫米。假若他們是圓柱形的，那麼它們的總面積有85平方米。所以肺有如此大的擴散面積，是因為它分成了無數的單元之故。

呼吸道與氣流（Airways and Air Flow）

呼吸道包括了一系列的分枝，由寬、長而漸窄、短，再分成很多很多的小枝管，深入肺臟（圖3）。氣管（Trachea）分成左右兩主支氣管，再分成大葉支氣管及小葉支氣管（Lobal & Segmental bronchi），繼續往下變成終末小支氣管枝（Terminal bronchioles），除了肺泡外，終末小支氣管是最小的了；以上的氣管、支氣管構成了呼吸道（Conducting airways），其功能是引導吸入的空氣到肺中行氣體交換的地方（圖4）。由於呼吸道沒有肺泡，所以它們本身不行氣體交換而形成了解剖上的無效腔（Anatomical dead space），其容積大約有150毫升。

終末小支氣管再分成呼吸性小支氣管（Respiratory bronchioles）就有一些肺泡附在管壁上，最末我們就看到了肺泡道（Alveolar ducts）全由肺泡排列而成；這些有肺泡部份的肺臟，正是行氣體交換的所在，稱之為呼吸區（Respiratory zone）。終末小支氣管遠端的部分，形成了一種解剖上的單位，稱之為第二小葉或小囊（Secondary lobules or acinus）。由終末小支氣管到最遠端的肺泡，其間距離僅約5毫米，但是呼吸區構成了大部分的肺，容積有2500毫升。

吸氣時胸腔容積變大，空氣被吸入肺，這些容積增加的部分是由於橫膈（Diaphragm）收縮向下降及肋間肌（Intercostal muscles）提高肋骨增加胸腔的橫斷面而來的（Bucket handle action）。吸入的空氣流入終末小支氣管，就像水由水龍頭流出一樣，但是由於氣管很多，而使呼吸道加起來的橫切面相當的大，致使氣體的流速變成很小（圖5），在呼吸道內，氣體的擴散作用是呼吸區通氣（Ventilation）的主要機轉，於呼吸道內，氣體分子擴散的速度相當的快，涵蓋的距離又那麼短，所以在下一個小葉，其濃度的差異可以忽略。因為在終末小支氣管內氣體的速度很快的下降，所以吸入的塵埃便常落在那兒。

肺具有彈性，在靜止狀態下呼吸，可以被動的回復到吸氣前的容積；它很容易擴張，正常呼出500毫米氣體，擴張壓只需低於3公分水柱的壓力，相

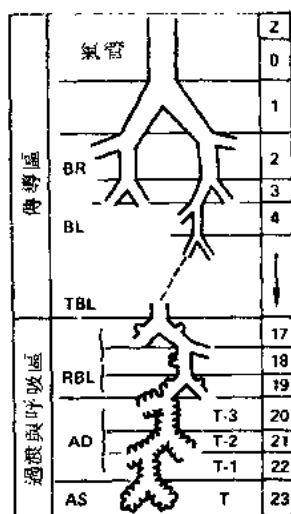


圖 4 Weibel 的理想化呼吸道

。前 16 節 (Z) 為引導區，後 7 節為呼吸區。BR 支氣管，BL 小支氣管，TBL 終末小支氣管，RBL 呼吸性小支氣管區 A，D 肺泡小管，AS 肺泡囊。

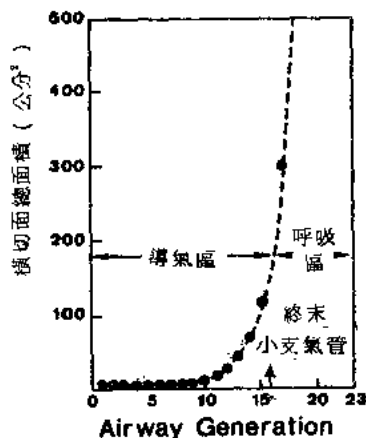


圖 5

圖示在呼吸區 (Respiratory zone) 橫切面的總面積很快的增加。造成吸氣時在呼吸性小支氣管氣體的向前流速度成很小，擴散作用成為主要的通氣機轉。

對的，一個小孩的氣球，需要 300 公分水柱的壓力，才能得到相同容積的改變。

把氣體吸入呼吸道所需的壓力也很小，正常吸氣時，沿呼吸道往下吸入流速 1 公升 / 秒的氣體，只需要比 2 公分水柱還小的壓力即可，比較起來，吸煙斗要得到相同的情形，則需 500 公分水柱的壓力。

血管與循環 (Blood vessels and Flow)

肺部血管也形成一系列的分枝，由肺動脈到微血管再回到肺靜脈。起初動脈、靜脈與氣管枝一起沿行，但到了肺周邊的時候，靜脈分離伸展到各個肺小葉之間，而動脈與氣管枝一起進入肺小葉的中間。微血管在肺泡壁形成了很密的網 (圖 6)，直徑大約 10 微米 (micron)，恰好有一個紅血球大，每段微血管的長度都很短，所以這密密的網，在肺泡上形成了一連串不

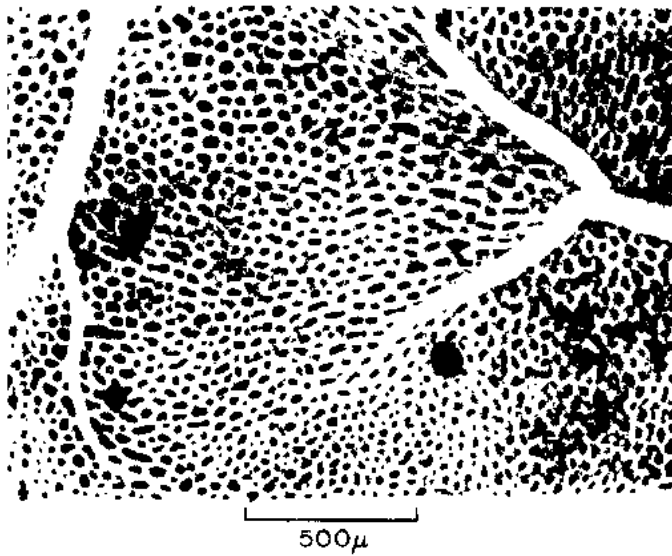


圖 6 青蛙的肺泡壁顯示了微血管緊密的網狀。可見到一個小動脈（左）與靜脈（右）
微血管各段均非常短，所以血液幾乎形成連續不斷的一片。

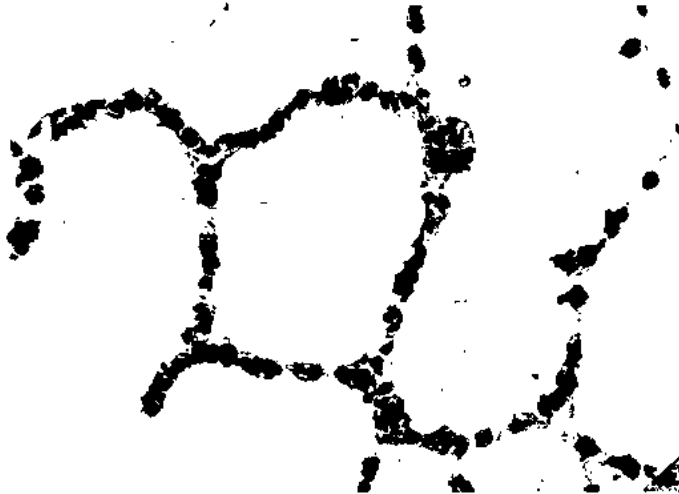


圖 7 狗肺的顯微切片顯示了肺泡壁內的微血管。血—氣體障壁非常薄以致在此無法認出
（與圖 1 比較）這是當仍有血液灌流時迅速地凍結而做的切片。

斷的血索，這種安排對氣體交換非常有利。肺泡壁並不是常都像圖 6 一樣。一般在顯微鏡底下橫切面（圖 7）看到微血管內的紅血球，且特別要強調的是，血液能夠很廣面的接觸到肺泡內的氣體，它們之間只有一層薄薄的血液—氣體障壁（Blood-Gas barrier）（與圖 1 比較）。

肺動脈接受了右心室輸出的血，但是肺循環的阻力非常小，平均肺動脈壓只要 20 公分水柱，血液流速即可達 6 升 / 分。（同樣的流速經過蘇打麥管，則需 120 公分水柱的壓力。）

每個紅血球在微血管網內只花 1 秒鐘，在這段時間內，它可能經過二到三個肺泡。由於解剖上的有效安排，氣體交換在這短短的時間裡，即可使肺泡內的氣體與微血管血液裡 O_2 與 CO_2 達到完全的平衡。

肺尚有另外的血液系統，就是氣管枝循環，供應吸吸道一直到終末小支氣管，這些血大部份由肺靜脈回流。氣管枝循環只是肺循環的一部份，沒有它肺依然能有很好的功能，例如，移植後的肺臟。

在對肺的功能、解剖做了粗略的說明之後，讓我們略述一下肺所克服的兩個特殊問題，做為結論。

肺泡的穩定性 (*Stability of alveoli*)

肺是由 3×10^8 個直徑 0.3 毫米的肺泡集合而成的，像這樣的結構，生來即為不穩定。因為肺泡上的液體表面張力，力量相當的大，使肺泡有瓦解的傾向，特別是小肺泡變空而容到大的肺泡裡。幸運的是，在肺泡上有些細胞，分泌一種所謂「表面作用劑」（Surfactant）的物質，能顯著的降低肺泡的表面張力，尤其是小肺泡。雖然異常的情況下，小肺泡萎陷是可能的問題且經常地發生，總之，肺泡的穩定性是增加了不少。

濾除吸入的塵粒 (*Removal of inhaled particles*)

以 50—100 平方公尺的表面積，肺正暴露於日趨污染的環境中。處理吸入塵粒的機轉有幾種，大的顆粒在鼻腔即被濾除，落在呼吸道的較小顆粒，則是由黏液向外除去，這些黏液不斷的把雜物向會厭（Epiglottis）清除。黏液是由氣管管壁的杯狀細胞及黏液腺所分泌，被數百萬的小纖毛推動著（圖 8），正常情形下這些纖毛很規律的運動著，但是當吸入某些毒素時，會癱瘓不動。

肺泡沒有纖毛，落在肺泡的顆粒，由所謂的吞噬細胞（macrophages）包圍起來，將污染的物質經由淋巴或血液循環從肺除去。血球如白血球也參

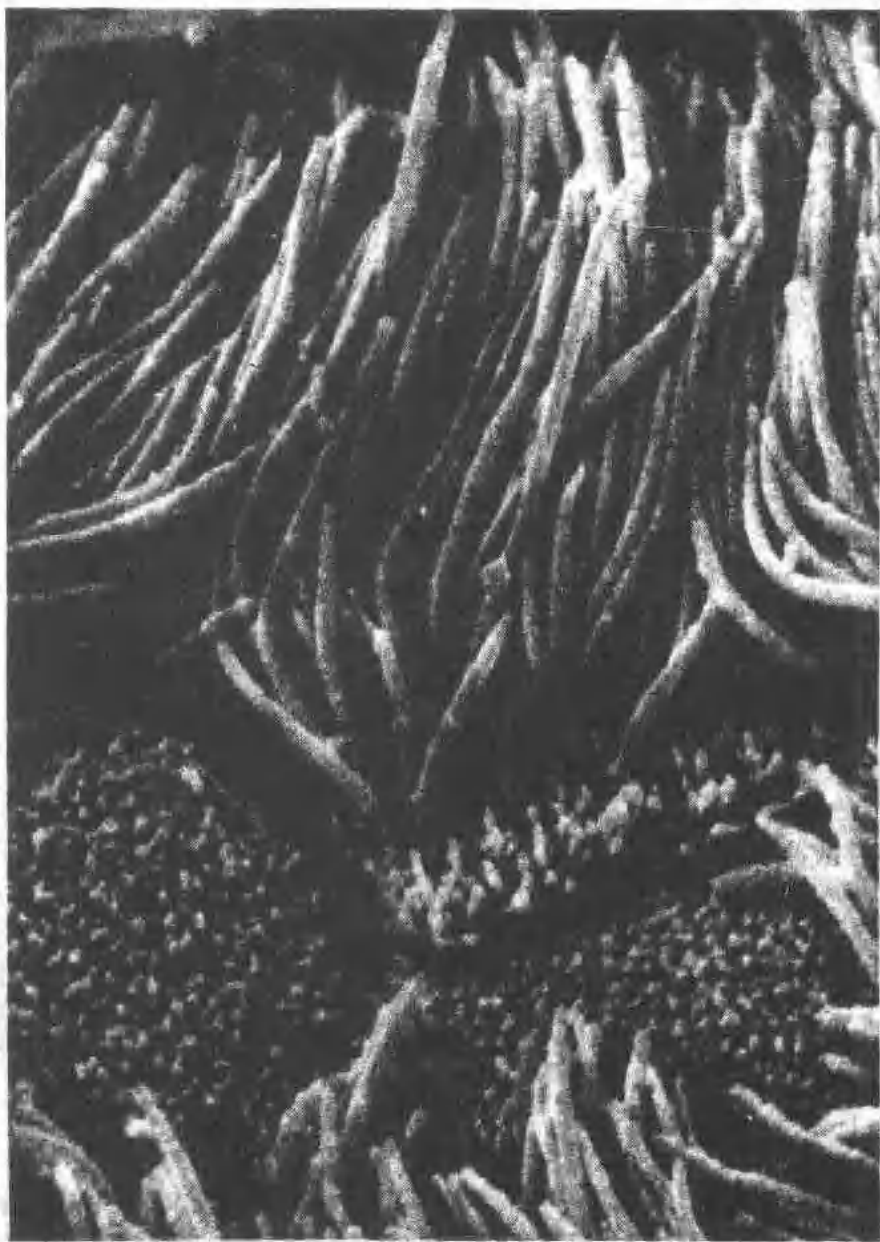
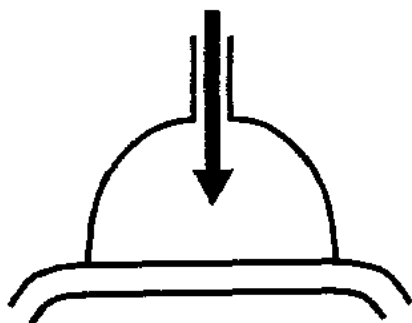


圖 8 顯示一支氣管管壁以纖毛推動黏液如此將渣物清除出去。

與了防禦異物的反應。



第二章 通 氣

(Ventilation)

氣體如何進入肺泡 (how gas gets to the alveoli)

下面的三章，接著討論的是，氣體如何進入肺泡、如何經過血液—氣體接觸面 (Blood-Gas Interface) 與如何由肺進入血液中。這些功能是各自藉著通氣 (Ventilation)、擴散 (diffusion) 與血液循環 (blood flow) 而完成的。

圖 9 是肺的一個簡圖，由不同的氣管構成的呼吸道 (看圖 3)，現在以單獨的一個管子，來代表解剖上的無效腔，之後為肺的氣體交換區，其內充滿了血液—氣體接觸面及肺微血管。每次吸氣大約有 500 毫升的空氣進入肺內，即潮氣容積 (Tidal volume)。對整個肺容積來說，解剖無效腔只佔很小的一部份。同時微血管與肺泡的氣體容積相比，也是非常的小 (請與圖 7 比較)。

肺容量 (Lung volumes)

在討論氣體進入肺之前，先約略的瞭解一下靜態的肺容積。某些靜態的肺容積可以藉著肺量計 (Spirometer 圖 10) 測定之。呼氣時，浮筒上升記錄筆尖下降，在一轉動的鼓上劃下記號；首先可看到正常呼吸 (即潮氣容