

第二版

醫學影像 物理學

The Physics of
Medical Image

編著 莊克士 教授
國立清華大學
生醫工程與環境科學系
核子工程與科學研究所



合記圖書出版社 發行

第二版

醫學影像 物理學

The Physics of
Medical Image

編著 莊克士 教授
國立清華大學
生醫工程與環境科學系
核子工程與科學研究所



合記圖書出版社 發行

國家圖書館出版品預行編目資料

醫學影像物理學 / 莊克士編著. — 二版. — 臺北市 : 合記, 2012.02
面 : 公分

ISBN 978-986-126-822-4(精裝)

1. 影像醫學 2. 影像診斷 3. 超音波學

415.216

101000119

醫學影像物理學(第二版)

編 著 莊克士

助理編輯 黃國鍾

創 辦 人 吳富章

發 行 人 吳貴宗

發 行 所 合記圖書出版社

登 記 證 局版臺業字第0698號

社 址 台北市內湖區(114)安康路322-2號

電 話 (02)27940168

傳 真 (02)27924702

網 址 www.hochitw.com

80磅雪銅紙 624 頁

西元 2012 年 3 月 10 日 二版一刷

敬告：本書內容之資料及數據僅供參考，如有任何疑問讀者需自行請教專家確認無誤後再使用。

版權所有・翻印必究

總經銷 合記書局

郵政劃撥帳號 19197512

戶名 合記書局有限公司

北醫店 電話 (02)27239404

臺北市信義區(110)吳興街249號

臺大店 電話 (02)23651544 (02)23671444

臺北市中正區(100)羅斯福路四段12巷7號

榮總店 電話 (02)28265375

臺北市北投區(112)石牌路二段120號

臺中店 電話 (04)22030795 (04)22032317

臺中市北區(404)育德路24號

高雄店 電話 (07)3226177

高雄市三民區(807)北平一街 1 號

花蓮店 電話 (03)8463459

花蓮市(970)中山路632號

成大店 電話 (06)2095735

台南市北區(704)勝利路272號

推薦序

同事莊克士教授與我在清華大學原子科學系共事多年。他於1993年自美國回清華任教時，即開始利用課餘時間，撰寫《醫學影像物理學》一書。莊克士教授先後接受核子工程、保健物理、醫學物理三種專門的嚴格教育，對於游離輻射的認識至深。他的寫作以簡潔、直接切入，以及抓住要點見稱。在撰寫這本書的過程，每完成一章，我就先睹為快，順便在文字和名詞上稍作潤飾。所有的稿件均由他自行打字、繪圖，可謂全心全力的投入。

除了傳統的放射診斷及核子醫學外，他以較長的篇幅介紹磁共振造影。另就診斷統計學、影像模式，以及影像檔案與通訊系統均闢有專屬的章節分別作介紹。

這是一本很難得的書，可作為專業人員的參考及大專醫理工科學生的教材。茲值付梓前夕，僅綴數語為之道賀並代序。

翁寶山 謹識

財團法人中華民國輻射防護協會執行長
清華大學兼任教授

推薦序

X-ray medical imaging started just 100 years ago in Wilhelm Conrad Roentgen's laboratory. This century has witnessed the refinement of the X-ray tube, development of the automatic film processor, the image intensifier, nuclear medicine (NM) and ultrasound (US) imaging technology, computed tomography (CT), magnetic resonance imaging (MRI), direct digital radiography, and imaging management tools. All these developments have been made possible through a close collaboration among academic institutions, medical imaging manufacturers, and the health care industry.

First, a need is generated in the health care industry for a better diagnostic tool for certain disease categories. Collaborating with health care physicians, academic institution researchers contribute original medical imaging concepts and prototype devices. The institutions also provide a breeding ground for the next generation researchers, physicians, physicists, and engineers. The private industry recruits the trained talents from the institutions and carries the concepts and prototypes to fruitful instrumentation for clinical use. Physicians in the health care industry test the innovative medical imaging devices to improve their diagnostic capability. The cumulative result is a better health care delivery system benefiting the welfare of patients. Through this close-knit cycle, information dissemination to all parties is vital for the continuous advancement of medical imaging. Dr. Chuang's book will fill in the need for this purpose.

Dr. Chuang's past experience as a medical imaging physicist with extensive research and development contributions in imaging signal-to-noise evaluation, CT, NM, 3-D imaging, and PACS provide him the impetus to author such an excellent imaging physics book.

The Physics of Medical Imaging consists of 30 chapters, covering the complete spectral in radiologic imaging including X-ray generation, radiography, thermography, angiography, mammography, CT, US, NM, MRI, and PACS. This book should serve as a text for the university senior and graduate level as well as a professional reference.

中譯

X射線醫學影像始於100年前的Wilhelm Conrad Roentgen實驗室。發展至本世紀，更於X-ray tube、automatic film processor、image intensifier、nuclear medicine (NM)、ultrasound (US) imaging technology、computed tomography (CT)、magnetic resonance imaging (MRI)、direct digital radiography、imaging management tools等方面有更為精細之進展。各項發展並透過學術機構、醫學影像儀器製造商，及健康照護產業間的共同研究，而應用推廣於各醫療層面。

起初，由於醫療界對某個疾病需要有更好的診斷工具，學術機構研究者因此藉由與醫療人員之合作，貢獻其原始醫學影像概念與雛形機；研究機構同時也是培植下一代研究人員、醫生、物理學家和工程師的溫床；私人企業則吸收學術研究機構方面的優秀人才，並利用相關概念發展出更有成效的儀器設備，以應用於臨床上；最後，健康醫療人員則藉著透過測試創新的醫療影像設備，改善其診斷能力。所有累積的各項研究成果都在提供病患更加有利的保健福祉環境。因此，在這個緊密結合的合作循環系統裡，資訊傳播到各個環結，對持續促進醫學影像發展是非常重要的，而莊博士的此本著作，正是針對此一需求而問世。

莊博士身為一位傑出的醫學影像物理學家，累積過去在imaging signal-to-noise evaluation、CT、NM、3-D imaging，以及PACS等相關研究領域之貢獻，轉化為寫作動力，成就此本內容豐富的影像物理學書籍。

本書首版包括30章（第二版增為31章），涵蓋放射影像學的完整內容，包括X光的產生、radiography、thermography、angiography、mammography、CT、US、NM、MRI，以及PACS。除可作為大學三、四年級學生和研究生的課堂教材，亦適用於相關專業人士的研究參考書籍。

黃煥慶 H.K. Huang, D.Sc., FRCR (Hon.)

Professor and Vice Chairman

Director, Laboratory for Radiological Informatics,

Department of Radiology,

University of California, San Francisco

USA

自序

自從X光的發現至今已有百年的歷史，X光機經過不斷的改良，衍生各種影像模式，今天放射儀器已成為非常重要的診斷工具。其中，有些儀器或方法曾一度流行，但是隨著其它影像模式的引進，而逐漸從醫療體系消失，如乾式攝影、身體切面攝影術，與立體攝影術等。而新的影像模式，如1940年代的超音波、1970年代的斷層掃描，以及80年代的磁共振造影等陸續的加入，使得影像功能越來越多，但是儀器卻越來越複雜。近年來電腦功能的不斷加強，且被大量的應用於診斷儀器中，也促使數位化放射科的架構儼然成型。這些演變，使得醫學影像的學問成為一門獨立的科學。

近年來，國內生活品質不斷提高，醫院裡也使用各種先進的診斷儀器來提昇醫療品質。為了提供最好的醫療服務，必須先了解儀器的原理。有人把儀器視為黑箱，認為只要知道輸入與輸出即可。但是如果能夠明瞭儀器的運轉原理，熟悉影響影像品質的各種參數，則更容易取得高品質的影像，不但減少病人的輻射劑量，也更能發揮診斷的效果。而環顧國內，介紹醫學影像的專書不多，而且資料不是很完整。有鑑於此，作者才動筆收集資料創作此書。

本書首版的完成要感謝翁寶山老師與曾洪隆君的校正。翁老師是作者碩士學位的指導教授，他對於科技中文文化的推行不遺餘力，本書的創作部分受其啟發。寫作過程，受到清華大學原子科學系（現改名生醫工程與環境科學系）諸位師長與學生的殷勤關切，並提供寶貴意見；雙親不斷的督促；以及家人（美玲、小宇與欣欣）的支持，使得本書得以順利完成。最後要感謝黃煥慶（作者博士論文的指導教授）與翁寶山兩位老師為本書題序。

本書主要內容是介紹各種放射診斷儀器的原理，可作為原子科學、醫事技術、醫學工程或是放射醫學學生學習醫學影像的入門教科書。首版是作者教學之餘，歷經三年瀝心瀝血之作，希望為醫學科技的本土化盡一棉薄之力。第二版除了在各章節更仔細的校正和補充修訂最新醫學影像知識信息外，還額外增加一章介紹當前的功能性磁共振造影 (fMRI)。作者才疏學淺，雖然已經盡了全力，錯誤之處在所難免，望讀者多多包涵，並歡迎隨時來信提供意見，俟再版時一併改進。

莊克士

目錄

第 1 章 X光機	1
第 2 章 光子與物質的作用.....	29
第 3 章 射束調整器	45
第 4 章 散射與柵板	55
第 5 章 影屏	75
第 6 章 軟片	89
第 7 章 透視攝影	105
第 8 章 立體放射攝影術	131
第 9 章 乾式放射攝影法	135
第 10 章 熱攝影.....	147
第 11 章 身體切面攝影術	163
第 12 章 數位放射攝影.....	171
第 13 章 進步型多射束等值攝影	183
第 14 章 血管攝影	189
第 15 章 乳房攝影	203
第 16 章 幾何因素	217
第 17 章 電腦斷層攝影	223

第 18 章 超音波.....	249
第 19 章 核子醫學.....	295
第 20 章 磁共振造影 (I) – 基本原理.....	333
第 21 章 磁共振造影 (II) – 成像技術.....	347
第 22 章 磁共振造影 (III) – 影像系統.....	383
第 23 章 功能性磁共振造影.....	403
第 24 章 數位影像.....	425
第 25 章 對比劑.....	435
第 26 章 影像品質.....	447
第 27 章 品質保證.....	461
第 28 章 診斷統計學.....	489
第 29 章 影像模式.....	503
第 30 章 影像檔案及通訊系統.....	509
第 31 章 輻射劑量與輻射防護.....	539
中文索引.....	563
英文索引.....	587

X光機 (X-Ray Machine)

1.0 緒論

在1895年11月8日德國科學家侖琴 (Roentgen) 發現從克汝克士管 (Crookes tube) (圖 1-1) 發出一種看不見的射線，它具有穿透物體的能力，稱其為X射線，又稱為X光。X射線的產生係利用快速電子於瞬間減速時，部分動能轉換成制動輻射所產生的。最初的克汝克士管不像目前所用的高真空管，也沒利用熱發射燈絲作為電子源，所以各個管的表現並不一致，且有無法預測的特性。在1896年時陰極就已經作成盃狀 (cup) 以利於電子流的聚焦。1899年的儀器顯示已經會利用孔光闌 (aperture diaphragm) 來消除焦斑 (focal spot) 外所產生的輻射；同時也用硬橡膠作X光管的屏蔽，可惜屏蔽效果不好，造成早期過多的輻射傷害。當時雖然人們還不太了解濾器 (filter) 的原理，還是用它來改進影像的品質，一般相信最早有防漏電 (shocking proof) 裝置的是1919年魏特 (Waite) 的X光機。現在通用的醫學診斷X光管是由美國科學家柯立芝 (Coolidge) 於1913年所發明的炙熱陰極管 (圖 1-2)，這個管被抽成高度真空，電子由陰極內的燈絲加熱所產生。無疑的，高度的真空是柯立芝管之所以能成功的最重要因素。

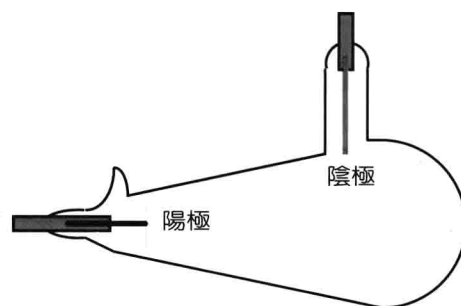


圖 1-1 克汝克士管

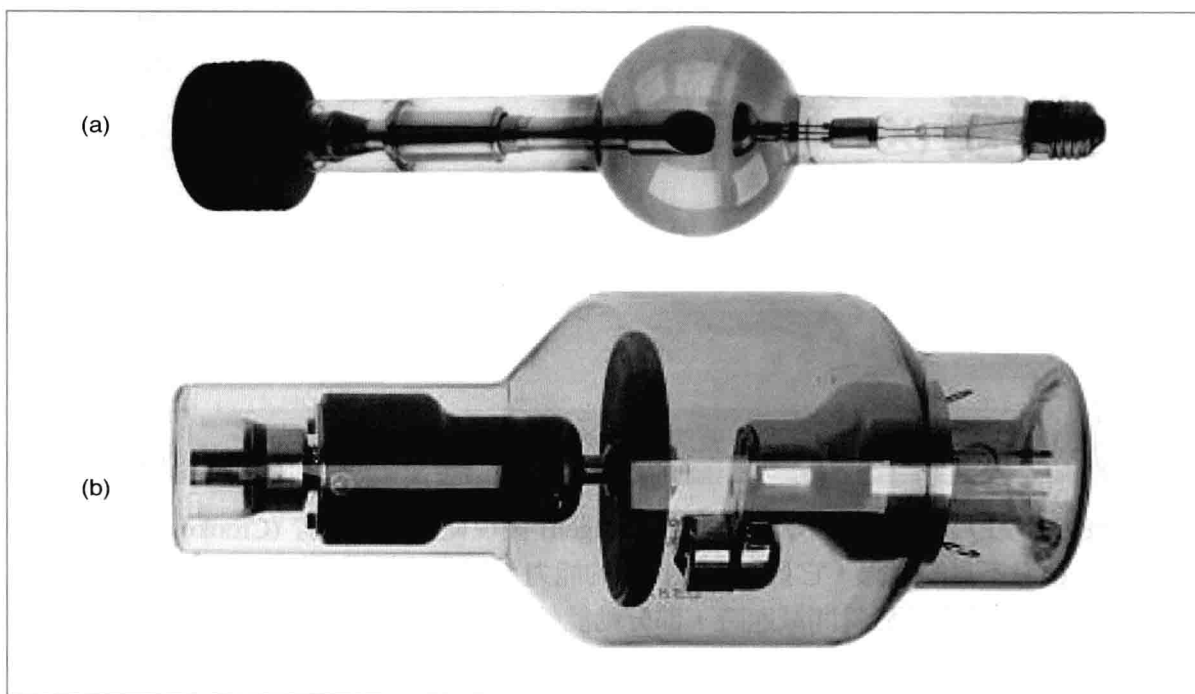


圖 1-2 (a) 柯立芝管與 (b) 現代所用的 X 光管

圖 1-3 繪出 X 光機的幾個主要構造。X 光管是電子加速產生放射線的地方；控制器是用來控制 X 光射束的強度，操作人員可選擇 X 光所需的電壓、電流及照射時間；電源裝置提供 X 光管所需的電力及加速電子的電壓。射束調整器是用來調整射束大小及能譜的裝置，包括濾器、準直器 (collimator)、圓錐體 (cylinder) 等，將於第三章詳細說明。

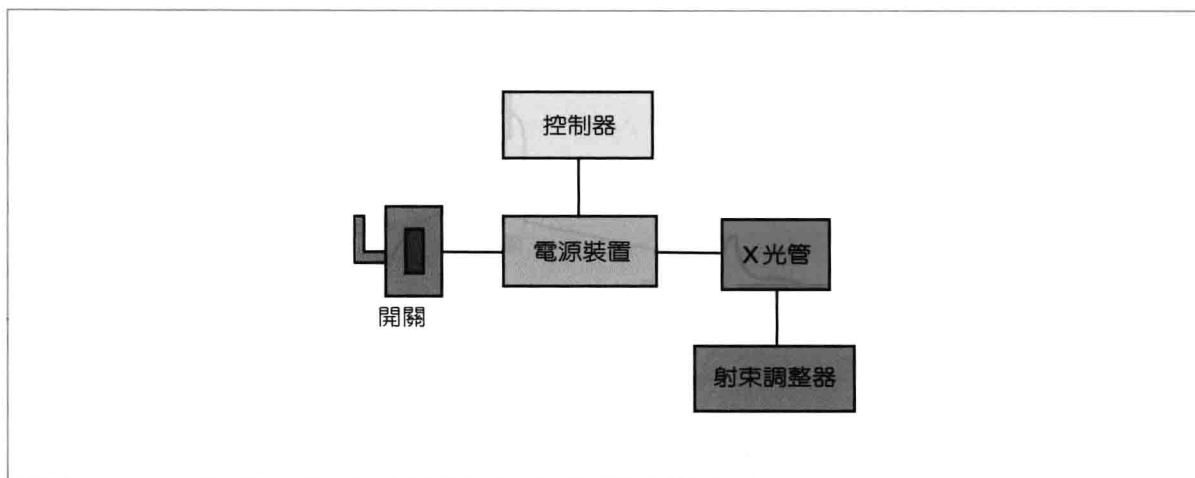


圖 1-3 X 光機的基本結構

1.1 X光管 (X-Ray Tube)

一個X光管（圖1-4）可分為下列幾個部分：(1) 陰極 (cathode)，(2) 陽極，(3) 加速電場，及 (4) 管套(housing)。

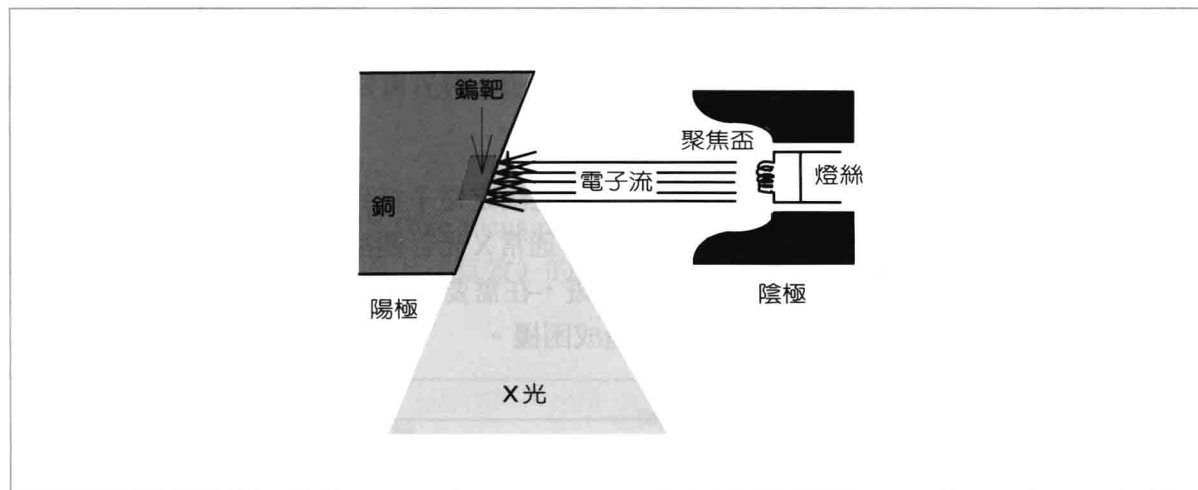


圖 1-4 X光管

1.1-1 陰極 (Cathode)

陰極主要是用一個燈絲作電子射源，燈絲和日常用燈泡中用熱來發光的燈絲一樣，只是它的加熱是用來產生電子。當金屬受熱時，原子會吸收熱能，其中有些電子吸收足夠能量後便可在金屬表面上自由跳動而離開。此種脫離的過程叫作熱離子發射 (thermionic emission)。電子逃出金屬後，會在其附近聚集，這就是所謂的空間電荷 (space charge)。這些電荷會形成電場防止其它更多的電子逃離金屬表面，且當電子離開時，金屬表面會變成正極而將部分電子吸引回去，所以當金屬加熱達到發射溫度時，金屬的表面會迅速達成電子平衡 (electron equilibrium) 的狀態，加熱所產生的電子數目是隨金屬的種類與溫度而定。

通常燈絲 (filament) 是用金屬作成線圈 (coil)，此形狀較容易產生電子。金屬線圈的加熱，可藉由電流通過線圈而達成；電流量大，則線圈溫度就高，溫度越高，電子數目越多，電子加速後與陽極作用所產生的X光子也越多。很多金屬都可用來作線圈，然而由於鎢 (tungsten) 絲有很高的熔點 (3370℃)，極小的揮發性及可作成極細的線圈的高延展性，它常被用來作燈絲。鎢絲的直徑約為0.2 mm，通常作成長1 cm直徑為0.2 cm的線圈，鎢絲一般要加熱到2200℃左右，才可發射足夠的熱電子。

當電子從陰極飛往陽極途中，由於電子間同性的互相排斥，整個電子流會形成愈來愈大的電子雲，等它們飛抵陽極時，其撞擊的區域已不是個單純的一點，而是有相當的面積。一個由有限面積發出的X光射源，會影響將來影像的解析度。這種擴散的現象可用電場來約束它，如圖1-5所示，把聚焦盃 (focus cup) 的電壓維持在比燈絲稍低的水平上，由於電場的作用，電子會往靶的方向聚集。若是（其局部性）電場強度比陽極所造成的更強的話，這個聚焦盃甚至可以把電子雲有效地包封在聚焦盃裡，阻止電子飛向陽極，因此聚焦盃也可用來做開關。有些X光管具有額外引線接到聚焦盃上，因此可任意調整其電位來控制電流的開關，叫作柵極控制管 (grid-control tube)，對於需要急速開關的活動透視攝影 (cinefluorography) 或照射時間極短的檢查非常有幫助。

線圈的長度及半徑，聚盃的大小及形狀，都能決定電子打到陽極時所形成焦斑 (focal spot) 的大小。焦斑對光影像的品質影響非常大。通常X光管裡都有兩組燈絲，粗的燈絲用在管電流大的情況；細的燈絲用來產生小的焦斑，在需要高解析度攝影時用。兩組燈絲都聚焦在陽極的同一部分，在實際操作時不會造成困擾。

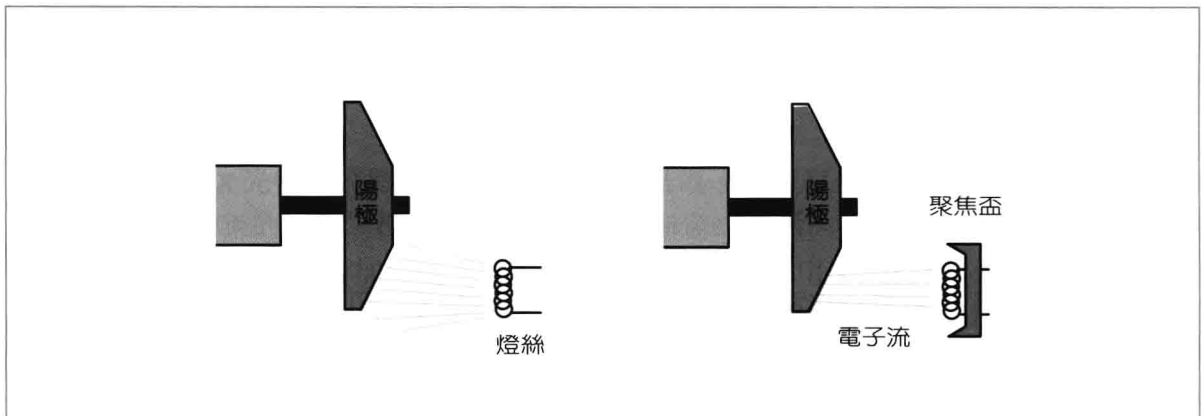


圖 1-5 聚焦盃與電子流的關係

1.1-2 | 陽極 (Anode)

電子流由陰極發出，加速後打到陽極。電子衝擊的區域叫作焦斑或靶 (target)。其中大部分的能量是以熱的形式被陽極吸收，約有1%的電子會將能量化成X光。陽極不斷受電子的衝擊，表面會形成很多的小坑 (pit)，這些小坑增加X光的散射，使很多光子偏離有用射束 (useful beam) 的方向，造成X光強度減少。

由於電子撞擊產生的熱相當大，會破壞陽極，因此需要一個大焦斑（熱量是均勻分布在整個焦斑上）以便順利將熱散發給冷卻液，但是大的焦斑又會造成X光影像的不鮮銳 (unsharpness)。

線聚焦原理 (Line Focus Principle)

使用小焦斑並且能通過大電流是最理想的。如果使焦斑與電子進入方向成一角度 θ [圖 1-6(a)]，入射的電子流打到點A及C間的靶上，線AC代表實際的焦斑；而由軟片方向來看則有效的焦斑為b，由三角正弦函數的關係可得：

$$b = AC \sin \theta \quad (1-1)$$

這就是所謂的線聚焦原理 (line focus principle)。如果AC固定，則隨著角度 θ 的增加，有效的焦斑也變大。由於表面上（有效）的焦斑看起來比實際上還小，故可以達到最大散

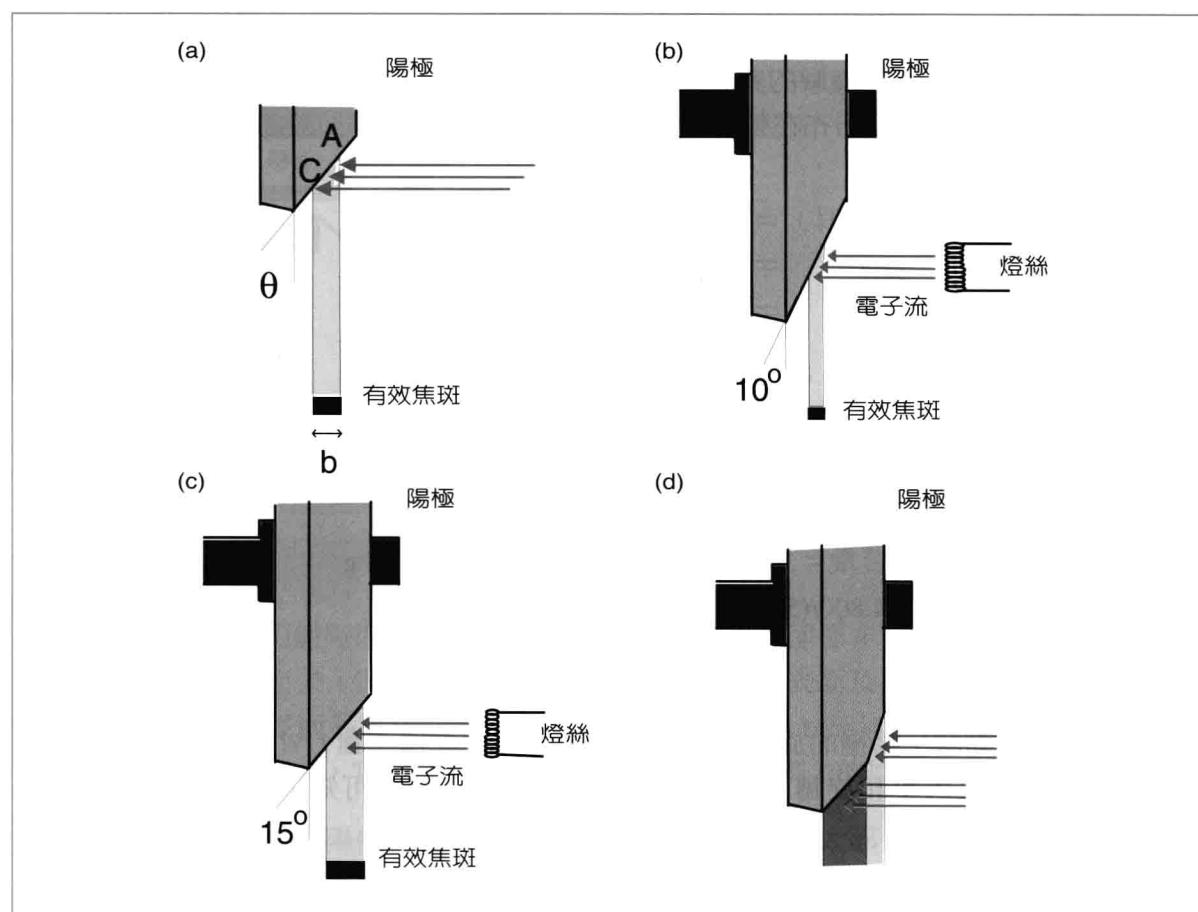


圖 1-6 有效焦斑與陽極角度的關係

熱面積與小焦斑的好處。角度愈小，愈能利用大面積作散熱，同時也有小焦斑的作用，但是由於腳跟效應¹(heel effect)，所以角度僅能在6-15°間。有些廠商設計的陽極有兩個斜角〔圖1-6(d)〕，大角度用於一般檢查，小角度用在特殊檢查如血管攝影（需要極小的焦斑、大的熱容量），而小角度的腳跟效應影響可用小照野 (field size) 來克服。

固定陽極 (Stationary Anode)

固定陽極 (stationary anode) (圖1-4) 是由一個薄的鎢片（約2-3 mm厚）嵌在一個大的銅塊之中。電子打到靶後就被吸收，只有1%的能量化成X光，其餘的能量都轉換成熱能，被陽極所吸收，所以耐高溫及熔點高 (3370 °C) 的鎢是靶的理想材料，鎢的另一個好處是它的原子序數 ($Z = 74$) 高，可以更有效的產生X光。但是鎢並不是一個良好的導熱體，所以它必須與銅結合在一起，利用大塊的銅來幫它散熱以加速冷卻。銅的熔點並不高 (1070 °C)，一次照射下通常鎢靶的溫度可上升1000 °C左右，會把銅塊融化。因此靶的面積通常比焦斑大很多，能儲存一些熱量以減少銅塊的負荷。

【例題1-1】在某次攝影時，使用電壓為100 kVp²，電流為100 mA，及2秒的曝露時間。若陽極質量為500 g，被撞擊的表面積為30 cm²。試問經過一次照射後，靶的溫度升高多少？比較 (a) 熱量瞬間分布在整個陽極，及 (b) 假設熱量沒有從被撞擊區域散逸而集中在表面下1 mm的範圍內。

$$\begin{aligned}
 \text{【解】 靶產生的總能量（焦耳）} &= \text{電壓} \times \text{電流} \times \text{秒} \\
 &= 100,000 \times 0.10 \times 2 \\
 &= 20,000 \text{ J} = 4,800 \text{ Cal}
 \end{aligned}$$

鎢的密度為19.3 g/cm³，比熱為0.03 cal/g °C。

(a) 陽極的熱容量為500 g × 0.03 cal/g °C = 15 cal / °C。

陽極的溫度上升為4,800/15 = 320 °C。

(b) 被撞擊體積之質量 = 30 cm² × 1 mm × 19.3 g/cm³ = 58 g

溫度上升為 = 4,800/(58 × 0.03) = 2760 °C。

旋轉陽極 (Rotating Anode)

當X光機啟動時，陽極的旋轉可以增加焦斑的有效面積〔圖1-7(b)〕，使陽極壽命延長。只要比較焦斑大小和旋轉時電子所撞擊過的總面積，就可知道旋轉陽極 (rotating

¹X射線的強度隨角度而異，陽極這一端最低，是為腳跟效應。

²kVp (peak kilo voltage) 是以仟伏為單位的巔峰電壓。

anode) (圖 1-7) 的優點。假設焦斑大小為 14 mm^2 (長 7 mm ，寬 2 mm)；而電子撞擊的地方其半徑為 40 mm ，則旋轉時焦斑在陽極上形成一個周長為 251 mm 的徑跡，因此電子所撞擊的總面積就是 $1757 (=7 \times 251) \text{ mm}^2$ ，也就是說實際的面積增加了 125 倍，但是有效的焦斑還是同樣大小。

旋轉陽極所需的動力是藉由圍繞在光管的靜子 (stator) 線圈產生磁場所提供，這個磁場在轉子 (rotor) 的線圈感應出電流，以提供動力讓陽極旋轉。通常旋轉陽極的轉動速率高達每分鐘 3000 轉 (rpm) 以上，旋轉速率越快，由於任何一點所受撞擊越小，陽極越能承受高溫。可用下列兩種方式使轉速加快：(1) 縮短陽極的軸 (stem)，以減小陽極的慣性，或 (2) 使用密度較小的鉬 (molybdenum) (密度為 10.2 g/cm^3) 作軸，減輕陽極的重量，而且鉬合金有高強度、高熔點，及低熱傳導係數 (減少熱量由陽極擴散至轉子及軸承) 等優點。

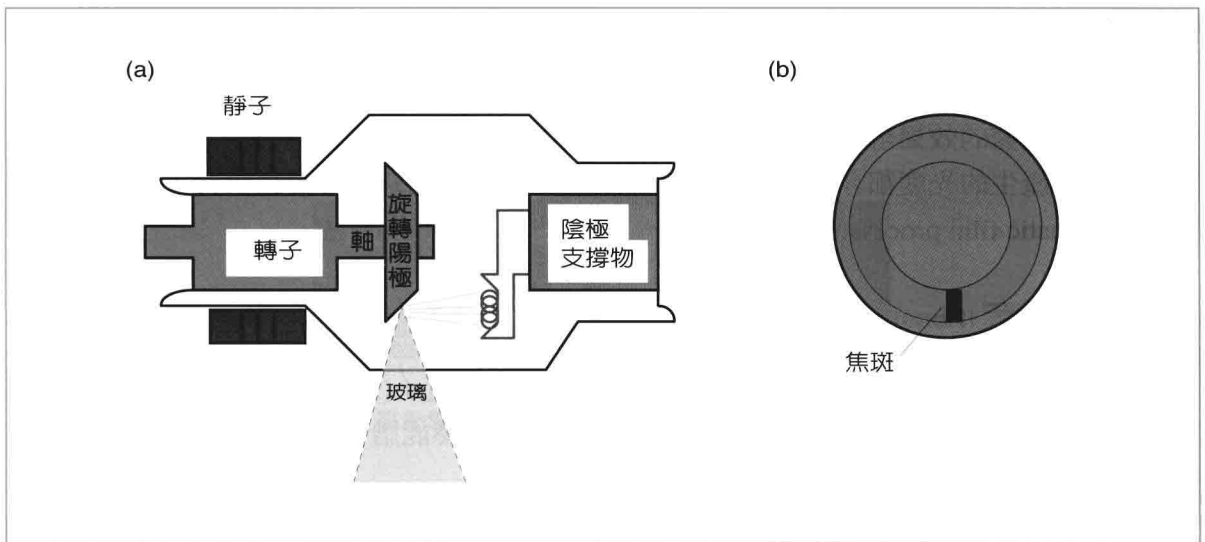


圖 1-7 (a) 旋轉陽極的主要構造及 (b) 焦斑與撞擊面積

由於轉速快、照射時間短，使得陽極溫度的上升及冷卻都非常快速，而且陽極表面是藉著輻射將熱傳送出去，因此表面比內部冷卻更快。由於表面及內部的熱膨脹不一樣會產生張力，使得陽極表面易被扭曲。目前大都採用 90% 鎢及 10% 鎳 (rhenium，一種熱容量很大的重金屬) 的合金，它比純鎢作成的陽極更能忍受熱張力的影響，並且熱容量更高。

目前的技術可允許陽極在相當高溫下操作在這種溫度下大部分的熱量是經由熱輻射把熱傳給管周圍的冷卻油液，這對於經常使用之 X 光管 [如電腦斷層掃描及血管攝影 (angiography)] 非常有用，冷卻液則經過熱交換後再循環使用。