

第四十六冊

非破壞性試驗

譯者：曾明哲
黃炳華

目 錄

什麼是非破壞性試驗？.....	1
爲什麼要用非破壞性試驗？.....	4
目前採用的方法.....	6
輻射穿透技術.....	9
超聲波的方法.....	17
穿透的工業技術.....	23
未來的展望.....	26

非破壞性試驗

原著：Harold Berger

譯述：曾 明 哲
黃 炳 華

什麼是非破壞性試驗？

丟下一枚硬幣，按下自動販賣機的開關就能拿到你的糖菓、香煙，或瓶裝飲料。

除非你正擔任自動販賣機或吃角子老虎的製造工作。這時你可能很少去想一些關於機器和你所丟下的銅幣。或許你會驚奇！當你曉得這部機器在把你所購買的貨品送到你的手上之前，曾經受過無數次的試驗，來保證它的性能。

從丟進硬幣到你的貨品跳出來的幾秒鐘間，機器是在測量硬幣的大小，形狀和磁性，（某些機器還要測重量和彈性。）

這些試驗必須迅速地進行，並且硬幣在試驗過後仍需有用。這方面，銅幣的試驗和工業上所做的許多非破壞性試驗大同小異。

非破壞性試驗並非局限在工業，醫藥或科學上的用途，其實在我們日常生活中也常常使用它。假如你在家裡洗盤子，不小心把盤子或玻璃杯掉在地上，當你從地上揀起並觀察它有沒有摔壞，你就是在從事一項非破壞性試驗。假如找不到一道裂痕或是一個缺角，你可能就可以斷定它是沒有破壞的，可以繼續它的既定用途！你只靠觀察來決定並沒有破壞它，因此你所從事的是非破壞性試驗。

另一方面，假如你認為盤子裡有一條看不見的裂縫，想用靠在膝蓋上把盤子壓壓看的方法試試，這樣的試驗就不叫非破壞性的。假如

你用力過甚，盤子即將破壞。這樣做，它就不能在它既定的用途上使用了！

顯然地，你我每天都在從事破壞性和非破壞性試驗，在上面的討論中，你也許會注意到我們使用“既定用途”這個片語，其實這個片語是決定破壞性，非破壞性的一項評斷。舉例來說，許多人可能認為 X——放射攝影術——以 X 射線穿過物體所得的可視像片來觀察物體。——是一項典型的非破壞性試驗，在許多情形下，X—放射攝影術廣泛地用在非破壞性試驗是一項正確的假設。然而，假如我們用這個方法來檢查一盒軟片，這個試驗可能就不是非破壞性的，X 射線所帶來的曝光無疑的將使軟片不適於“既定用途”。

試驗過後的物體仍然有用是我們定義非破壞性試驗的一項必要因素。讓我們把非破壞性試驗做如下的描述；一點也不會損害物體的未來用途的一項檢驗工作。這項檢驗工作的目的，可以用來檢查內在或外在的瑕疵，測量厚度，決定材料的結構或組成，測量或檢查物質的性質。試驗的方法可以是一項簡單的目視法，或者包括許多不同形式的電磁波；除可見光波外的 X 視線，紅外線或微波。圖表一表示出許多它能攜帶能量的形式的一部份。這項試驗所用的電磁波可以包括不同頻率的波動能量。頻率範圍包括上至可聽極限每秒 20,000 週到每秒 10 或 20 百萬週這個範圍，這就是非破壞性試驗常用的所謂超聲波。

事實上，幾乎任何物理現象都可以用來做為非破壞性試驗，而且其中許多已經確實使用過。在這本小冊子裡，我們勢必不可能（也不必要）逐項討論每一種不同的技術。然而我們能討論一些基本的方法和性質。此外，我們還想瀏覽一些目前正在研究的方法，以便對未來可能採用的非破壞性試驗獲得一些觀念。

電磁波光譜圖

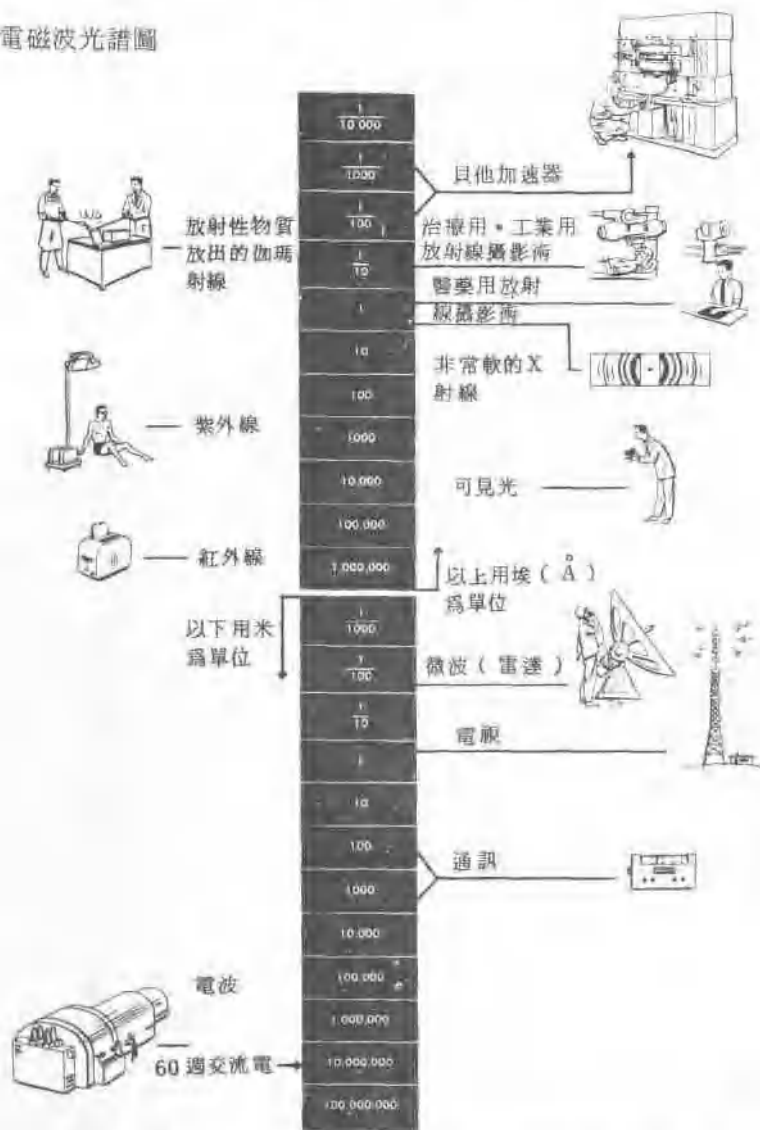


圖1 附有各種不同用途的電磁波光譜圖。圖的上方波長以埃(Å)做單位(1埃 = 10^{-10} 米)。下方以米為單位。

爲什麼要使用非破壞性試驗？

當你撿起一塊掉在地上的盤子或玻璃並觀察它是否破裂時，當一位店員把一枚硬幣丟進計算器中仔細聆聽它進帳的鈴響時，或當一位店員按一按番茄的軟硬，彈一彈甜瓜的果皮時，就是在進行非破壞性試驗的原理和方法。這些試驗的目的像它的方法一樣五花八門各式各樣。第一個例子是用來檢查盤子是否仍然有用。第二個例子是用來決定硬幣的組成，準確。第三個例子時用來決定甜瓜和番茄是否適於食用。工業上的非破壞性試驗的目標和上述幾種大同小異，或者有甚於此。

舉例來說，就像我們用目視法檢查盤子，飛機修護工人完成他們的例行非破壞性檢查工作，證實飛機的每一部份仍舊有能力執行它的任務，免除飛行事故。我們靠試驗決定是否繼續使用盤子或冒一次把桌子髒的危險，幫我們判斷是否繼續使用飛機或冒一次飛機失事的險。由它們冒險的大小，而決定在檢驗上所需花費的精力。

店員和他的硬幣給我們一項觀念，挑選和檢驗材料是一項重要的工業問題。以材料的磁性或電性來選擇金屬材料的試驗，是一項可以使用及易於瞭解的方法。無論如何，即使是今天仍然有許多不合規格的產品是歸咎於某些機械零件使用的材料不當。

要在工業上找到一個按一按番茄的軟硬的例子比較困難，店員靠這個試驗決定番茄是否適於食用。她也許可以算是相當於裝配線末端的試車員，決定車子是否合用？

事實上，非破壞性試驗安排在生產程序最後一個步驟之前，甚至在產品離開工廠還繼續實施。它在加工製造零件之前挑出不合規格的材料，在裝配成品之前挑出不合規格的零件，測量金屬或其它材料的厚度，在不透明的容器中決定液體或固體成份的標準，（從大型汽油桶到小啤酒罐都可以檢驗），挑選和檢驗材料，並且發現那些在處理或使用時將會形成瑕疵的材料。

這些試驗用來使產品更爲可靠，安全，更合經濟原則。當然，增加可靠性也改進了公衆對廠家的信用，無形中帶來更多的銷售和利潤。廠商更進一步還以非破壞性試驗改進和控制生產程序。

每一位廠家可能有許多動機作非破壞性試驗設備的投資，他將認識非破壞性試驗比破壞性試驗或安全試驗，具有更多的優點。破壞性試驗往往爲了證明產品的耐力，而把“少部份”的產品施以足夠毀滅它們的力量。安全試驗（Proof test）係對每一項產品施予它在使用中所能承受的最大力量，找出不合格的百分比。

從顧客的抱怨或工廠中對少數產品長期的試驗，甲廠家會發現他的產品並不如他所希望的那麼可靠，或者它的可靠性還不足以使產品在商場中競爭。乙廠家會發現他的工廠浪費許多時間和金錢在加工一些粗劣的材料，最後才發現它們的毛病而不得不捨棄。丙廠家在某些的生產線將用適當的非破壞性材料試驗，幫助他找出降低生產成本所需的改進。在許多情形下，非破壞性試驗由改進生產節省了金錢而並不增加花費。

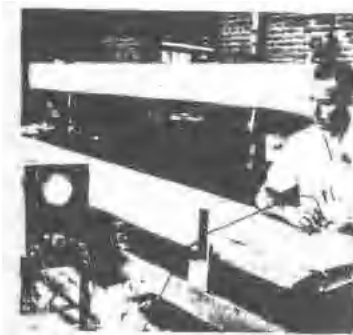


圖2 檢查員使用非破壞性超聲波試驗機於直升機轉子葉（rotor blade）尋找材料上不適當的接合。

目前由於核子反應器，高性能飛機和太空飛行的進展，非破壞性試驗日益需要（見圖二）由於可靠性是這些商品的重要條件，非破壞性試驗的價格因素比起其它消費物品，就顯得比較不重要。舉例來說，一架美國月球火箭優異地擊中它的目標，可是由於電視系統的失靈却帶來挫失和昂貴的損失。改進試驗將能預先找出麻煩的原因，不只節省其它試驗的浪費，也爲太空計劃的其它部門留下更充裕的時間和精力。

目前採用的方法

現在我們已有了非破壞性試驗的一些觀念，讓我們研究它的某些方法。這些方法由於所需裝備的不同，實施的試驗型式不同，等等的複雜性而有很大的變化。

許多非破壞性試驗的方法和我們自己的官感有很大的關聯，舉例來說，X射線，紅外線，微波和其它相似的輻射可以看做我們視覺的一種擴張，因為它們都包括在電磁波中和可見光相似。超聲波的方法相當於我們的聽覺，因為它們同是機械振動。檢查表面及表面間連接的縫隙的檢驗技術，像穿透法（*Penetrant techniques*），就可以算是觸覺的同伴。

官感本身就是某些重要的非破壞性試驗，例如把一只蛋放在強光之下，蛋的好壞即可以由目視檢查，同樣地我們用鐵錘敲擊金屬零件和它的接縫，由所發出的聲音檢查金屬材料的好壞。也許你會懷疑，檢查工作的成功與否有賴於前一天晚上工人有沒有睡好覺。今天工業的潮流趨向於複雜，由於零件的複雜，安全因素更需確實，尤其在太空科學及核能利用上，可靠性的需要愈趨嚴謹，因此使得試驗法更為精密。

幸好廠家和工程師手邊已經有許多可靠的方法等着去挑選。但這種優勢並非持久的，其實非破壞性試驗在以往十到三十年間已經有了長足的進步。從圖三我們可以找到最近幾十年來基本試驗方法和進展的情形。雖然圖中許多名詞是令人感到陌生的，但是在這本書我們仍然無法全部討論。圖中這棵樹上的每一枝支幹都代表非破壞性試驗的一種方法。

這裡“方法”樹的成長開頭非常遲緩，舉例來說，1895年，一位德國物理學家倫琴（*Wilhelm Roentgen*）發現X射線，不久之後醫藥用X射線立即在世界各地開始使用。但是工業非破壞性試驗却落後了，在第一次世界大戰之後，還沒有獲得有效的支持，一般來說，

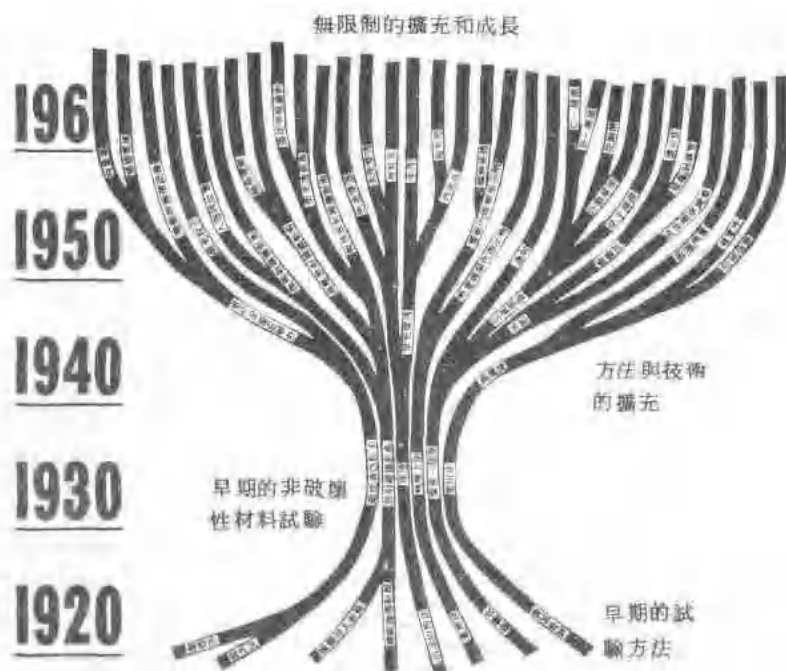


圖3 非破壞性試驗的成長

一直到第二次世界大戰還沒有受到很大的激勵。

初看起來，雖然是一件吃驚的事，可是這些遲延有它的理由。第二次世界大戰前，因為所有產品通常都考慮了很大的安全因數，因此並不迫切需要非破壞性試驗。當然，機器也發生過事故，例如火車軸和曲柄軸，雖然有很大的安全因數，仍然在使用時出了毛病。可是在這些事故中，材料上的不完善並不被完全承認，因此很少人集中精力去注意這些。

第二次世界大戰剛打完，影響產品使用壽命的缺點慢慢地被重視，在飛機設計，在核子工程，在最近的太空探險，高度的危險和價格因數使得更高的可靠性日趨重要。戰爭的那幾年，也證實了所有檢查方法，由於設計和產品規格的密切合作所形成的工業和應用科學的需

要，而有了大幅的成長。

這些方法雖然有許多相異點，但是也有很多共同點。下面就是許多非破壞性試驗的五大基本要素。

第一、需要一種探測的媒介，放出用來檢查受試物體的媒介。

第二、探測的媒介須隨受試物體的不連續和改變而發生變化。

第三、一個能偵檢出探測媒介所生變化的偵檢器。

第四、需要一種能指示或記錄偵檢器所生變化的器具。

第五、找到某些解釋這些指示和記錄的方法。

現在讓我們以X—放射攝影術為例看看如何應用這些五大基本要素。發射輻射的X射線發生器就是探測的媒介源，射線穿透受試物時發生一些改變，這項方法採用的偵檢器通常是對X射線敏感的感光軟片，由底片上的變黑作為這項試驗的指示和記錄，而解釋的工作通常是人為的觀察。

媒介源，變化，偵檢，指示及解釋，這五項基本要素在所有非破壞性試驗是相同的。讓我們再用摔在廚房裡的玻璃杯為例子，探測媒介（在這個例子中是光）源可能是太陽或電燈泡，所產生的變化就是光線從玻璃不同部份穿透或反射的情形。譬如說，一道裂縫將會反射較多的光線，至於偵檢器就是人的肉眼，指示光線穿透玻璃射入肉眼的改變量，在這個例子裡也用人的大腦來解釋它的結果。

也許你會懷疑是否可以用其它方法來解釋，這個問題的答案是肯定的，舉例來說，加上電子儀器和預設標準相比較的厚度規就常常拿來使用在這方面。有一些就裝在軋輥金屬片的機器上，提供我們這套軋輥機器所軋出的材料中什麼地方薄什麼地方厚。還有一種儀具，它能檢查罐頭容器裡果汁或牛乳的份量是否合乎規格，並把不合格的成

品彈出生產線。上面這個例子，就是自己能提供解釋的試驗裝置。

在高速控制的大量生產上，你將會發現上面的儀具在實用上是很原始的，許多情況下，特別是像反應器燃料元件，飛機或飛彈零件等臨界性物品（Critical items）的檢查，其解釋工作仍然需要有經驗的檢查員。爲了能獲得更高的工作效率，檢查員必須了解他所使用的試驗牽涉到的一些基本原理，下面的幾頁，我們將思考某些這類原理。

輻射穿透技術

非破壞性試驗所使用的穿透輻射通常是伽瑪射線或X—射線，能穿透相當厚度的材料的短波電磁波。科學上和工業上所用的非破壞試驗中的輻射就跟你在牙科醫生那裡，用X射源“看”穿透的牙齒和牙齦尋找疾病和蛀牙的證據一樣。在我們詳細討論這種方法之前，我們先來學一點有關輻射方面的事情。

這些射線就像光線，紅外線，無線電波是電磁波裡面的一種，然而就如圖一所示，它們的波長較短，就是因爲這種較大的波長，使X射線和伽瑪射線能够比波長較長的電磁波更容易穿透材料。

伽瑪射線和X射線的相異之處只有在輻射源和它的波長，伽瑪射線通常發自原子核，也就是說，伽瑪射線是一種發自放射性物質原子核的輻射，而X射線通常是用一具加高電壓把電子加速，然後把電子撞擊在金屬靶的機器，它們在原始上不涉及原子核。



牙科用X射線

通常用在非破壞試驗的伽瑪射線源是鈷60，這種伽瑪射線源能以不同的大小和強度來使用。一般一錠藥片形輻射源比一毛錢銀幣還小，平常還加上一具只有在曝露或試驗時才打開的重容器把它包圍起來，這個容器保護接近輻射源的人員屏蔽它所不斷射出的穿透性輻射

，屏蔽實際上的大小靠輻射源的強度和輻射的形式而決定。

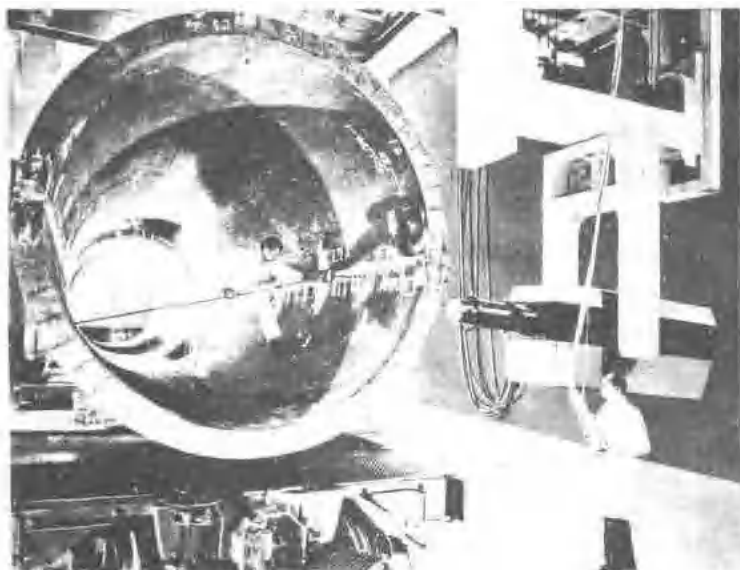


圖 4 射線源正用來以放射攝影檢查一架 8,000,000 伏特直線加速器的鋼管焊接情形。

X 射線機也有不同的形狀和大小，像你的牙科醫生所用的小型機器，通常在十萬伏特以下操作，工業上，帶這種電壓的機器只能檢查像鋁這種輕金屬的薄片。檢查更重的金屬，像鋼鐵一類的金屬，就需要更大的機器和更高的電壓，以產生所需的更短波長的 X 射線，典型的工業用檢查機在十萬伏特操作，用來檢查厚達三吋的鋼鐵。（也可以採用更大型的機器，並且趨廣泛。）加速器和貝他加速器（beta-tron）可以把電子加速到一千五百萬至兩千萬電子伏特的能量，以它作為 X 射線攝影術的輻射源可以用來檢查許多吋厚的鋼鐵或其它更厚的材料（參考圖 4）

不只是伽瑪射線和 X 射線，其它像電子和中子同樣也可以用來做

* 請參考本文庫“我們的原子世界”一書。

非破壞性試驗。所使用的電子通常來自X射線機器所產生的，也就是用X射線撞擊鉛箔。因為電子很容易被吸收，因此常用來檢查非常薄或非常輕的東西。

中子可以得自核反應器，加速器或自然放射性源。由於材料吸收中子和吸收X射線的不同，中子也有其特殊用途。舉例來說，對於鉛和鈾這一類密度大而原子序高的材料，較密度小而原子序低的材料X射線較容易被吸收。因此，這些材料的X射線檢查通常需要一套能產生幾百萬伏特的裝備，而且也要一般很長的檢查時間。另一方面，中子較容易透射較重的材料，因此曝露的時間比起X射線就可以大大地減短，圖五就是利用核反應器作為中子源來從事中子放射攝影術。

平常所最常用的非破壞性試驗穿透輻射是用底片放射攝影術（**film radiography**）——把輻射通過物體所產的影像記錄在底片上。這項技術已經被成熟地運用，截至目前，放射攝影術所耗費的底片

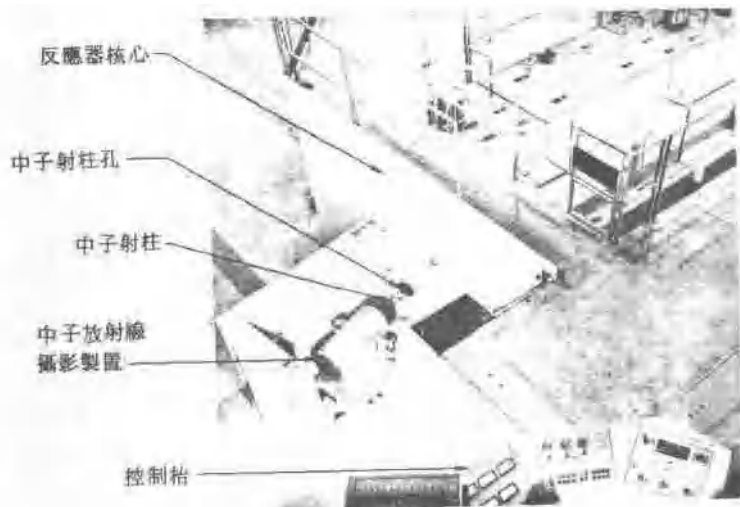


圖 5 國立阿岡研究所的夾格諾特研究用反應器 (Juggernaut Research Reactor) 鄰近反應器的 L 型牆內所安置的儀器就是用來做中子放射攝影術用的。這就是利用反應器輻射的許多應用之一。

量已經較所有業餘攝影家所耗費的黑白底片來得多，圖六就是這種方法的一項說明。

留意X射線從X射線管的靶上散逸，然後為途徑上的任何物體留上一個影子的情形，判斷試樣中的一個隙縫可能是鑄造時的一個氣孔，或是某些重金屬中的輕金屬雜質。

射進試樣的輻射，被縫隙所吸收的量遠比被其它材料所吸收的少，因此更多的輻射通過隙縫而撞擊在底片上，留下一個清晰的影子。它可以從沖洗出來的底片中找到一塊黑色塊，因而檢驗出隙縫的現況，大小及其形狀。

上面我們所提到試樣是假設除了隙縫的區域之外，其它部份都近乎厚度及稠度均勻的狀況下來說明的。事實上，在實際情形，並不是這樣。

我們X射線底片上的黑塊找到隙縫。同樣的，我們也可以用它來檢查材料上厚度的變化。例如在牙科醫生所為你攝取的放射攝影上，牙齦部分就因為是軟性組織的輕質材料，因此X射線的吸收量就比較少。在牙齦的陰影中所呈現的黑槽，就是因為缺少一些吸收輻射的材料。而填充物中通常含有銀一類的重元素，因為吸收量比較大，就顯出一塊顏色較淡的部份。（請參考第九頁的牙科用X射線圖）

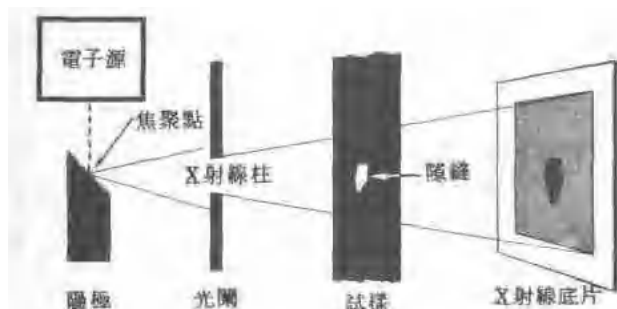
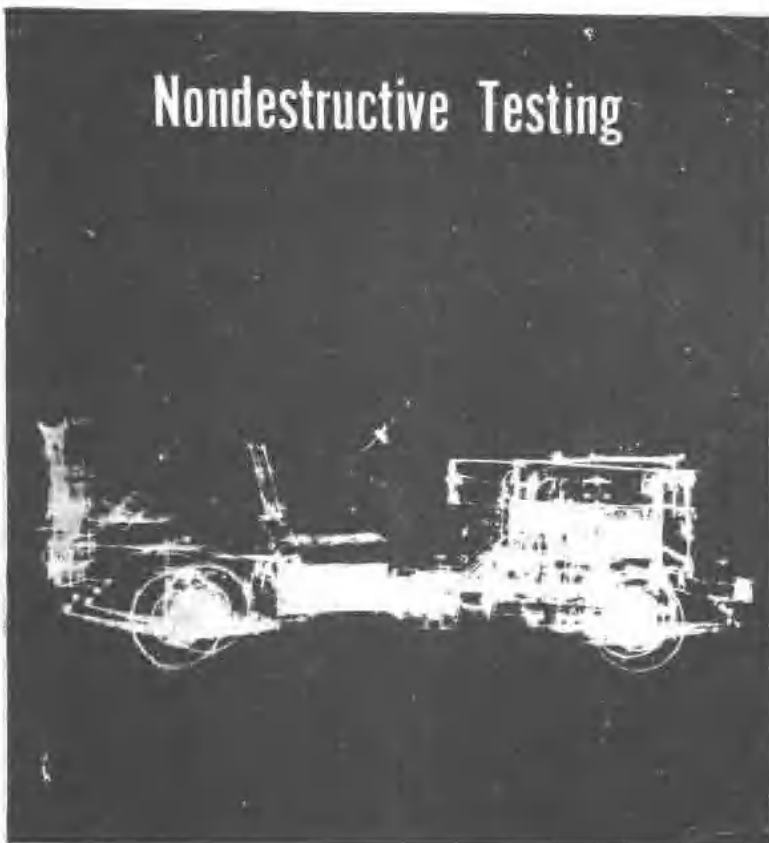


圖6 X射線攝影的基本排列圖，焦點是X射線管的陽極上或靶上的一小塊區域。管中的電子束撞擊到陽極上，焦點就成為X射線的輻射源。X射線的強度隨輻射所經過的試樣厚度而遞減。



上面是一張吉甫車的放射攝影圖，從車上各部位的明暗陰影，我們可以獲悉一些概念：首先看到輪胎部份的顏色比較淡，這就是X射線比較容易穿透的部位，而引擎部份就困難得多了。這是一張不平常的放射攝影圖，一方面是由於各部位穿透力的大小相差很大。另一方面，是由於它龐大的體積，（實際上它是由許多小張的放射攝影所組合成的。）（目前還沒有一種透鏡能夠像你在攝取快相那樣的把一個大型物體的X射線攝影焦聚在一小張底片上。）

自然有人會問起X射線所能偵檢的隙縫的大小。假設圖6試樣中

的隙縫在水平方向非常小，並且不比指示“隙縫”這兩個字的箭頭來得寬，以通常的X射線攝影術而言，假若隙縫在X射線方向的厚度是材料在同方向厚度的百分之二左右的話，它就有可能被偵檢出來。舉例來說，假若試樣是兩吋厚的鋼板，隙縫是薄而且平的空泡，那麼這個隙縫至少要0.040吋厚，才有可能被偵檢出來。假若厚度是相當小，就像平常的一條裂縫，那麼在X射線的底片上明暗的差別太小，以致於可能逃過檢查。

因此，以放射攝影來檢查裂縫，並不是一項十全十美的辦法。裂縫必須有相當的寬度或者在適當的位置使輻射能夠沿着裂縫的長通過一段距離。這類缺點的檢查通常採用其它方法，除了這項限制以外，底片放射攝影被廣泛地應用在非破壞性試驗的範圍內。它所以被人們樂於採用的一個理由就是，它所照出來的像片比起其它方法在解釋上要簡單得多。

穿透輻射也可以用其它方法來進行非破壞性試驗。另一種映像的方法是採用螢光鏡。這種方法在儀器的安排上除了把底片換作螢光屏之外，和底片放射攝影術是一樣的。當磷被X射線激發後，發射出強



圖 7 使用中的可攜帶式包裹檢查螢光透視機

度和X射線的強度成正比的可見光，因此除了明暗相反外，所得到的影像和底片上完全一樣。

螢光透視法有兩個優點：一是不必等待底片沖洗，二是物體可以在檢查中移動。圖7就是螢光透視法用來檢查手提箱的情形。

當然，它也有一些缺點，觀察者必須在接近輻射的區域看一個通常較為暗淡的影像，引起了影像的明亮度，輻射屏蔽以及操作者疲倦等等的問題。屏蔽問題的減低將藉助於使用鉛玻璃屏蔽窗及（或）反射鏡系統來增長操作員和輻射的距離，並且用吸收性材料保養操作員。那麼就可以增加輻射的強度改進影像的明亮。X射線影像強化器及閉路電視裝備等電子儀器使得明亮和屏蔽問題都獲得解決。

雖然螢光透視法的來用日見增多，然而底片法由於較為詳細和較佳的對照（使一些材料或厚度上的小改變都能被觀察到），並且自然獲得一張永久性的記錄，因為這些優點，在許多用途上還是寧可用底片法。



圖8 一種簡單的輻射厚度規，來自輻射源的輻射被受檢查的材料衰減，當厚度增加的時候，到達偵檢器的輻射強度就減小，假如用已知的厚度校正過偵檢器的讀數，那麼偵檢器就可以用來指示受檢查的材料厚度。