

# 放射性同位素 在工業上的應用

鈷-59並沒有放射性，但其同位素鈷-60卻具有放射性。

鈾的半衰期是45億年，而鈦-46的半衰期只有0.006秒。

對健康的成年人來說，一年內能忍受放射線照射的最高量是多少？

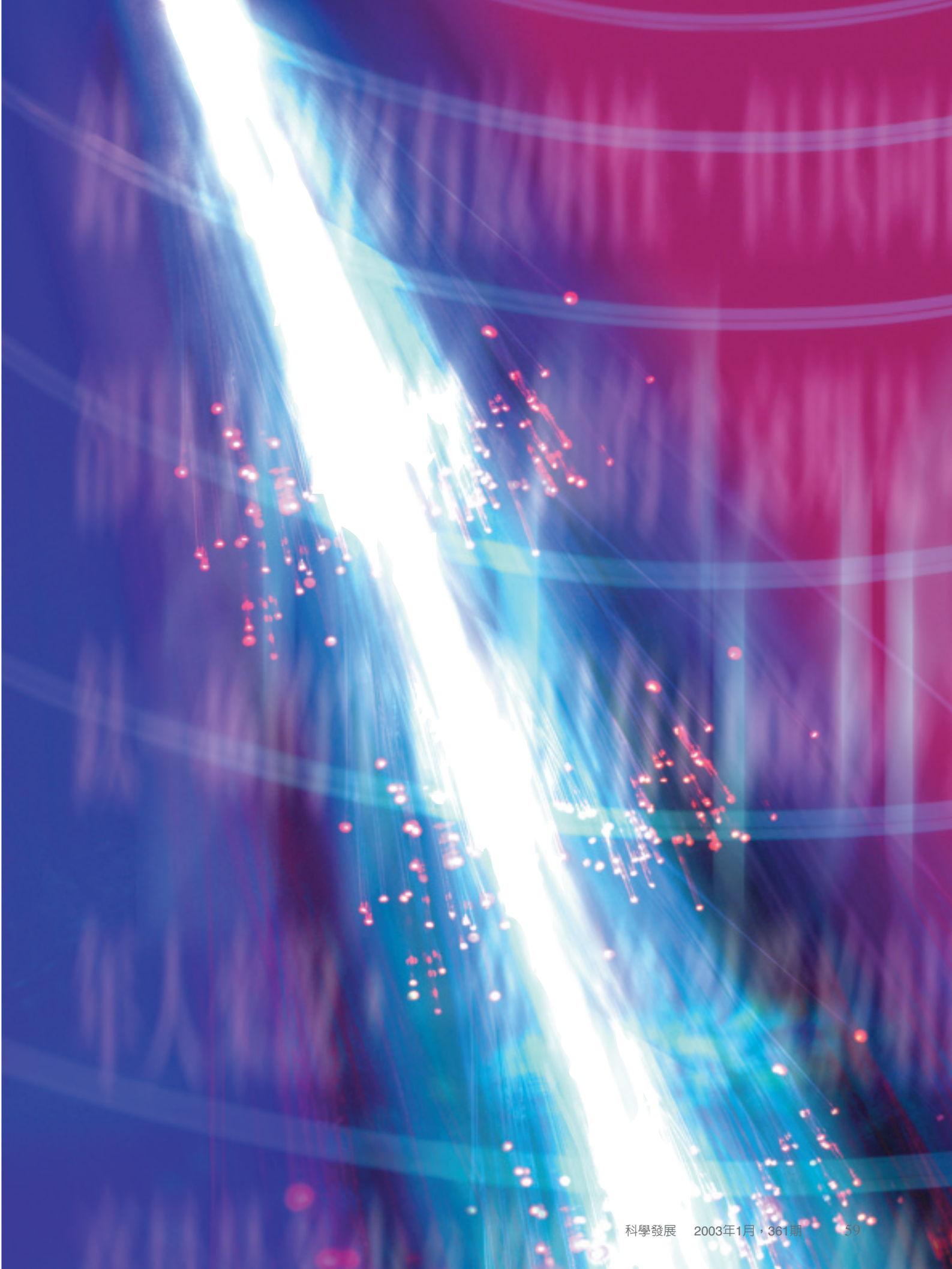
放射性同位素在工業上的應用又是如何？

## ■郝俠遂

看到「同位素」三個字，很容易把它跟放射性聯想在一起，到底兩者之間有甚麼關聯呢？如果兩個原子的質子數目相同，但是中子數目不同，則它們仍有相同的原子序，在周期表上是在同一個位置的，所以此兩者就叫「同位素」，就像是兄弟一般。例如正常的鈷原子中有27個質子及32個中子，二者數目加起來是59，我們稱它鈷-59，符號是 ${}_{27}\text{Co}^{59}$ ，並沒有放射性；而它的兄弟是大家耳熟能詳的鈷-60，符號是 ${}_{27}\text{Co}^{60}$ ，有27個質子及33個中子，就具有放射性了。

有放射性的同位素稱為「放射性同位素」，而沒有放射性的同位素則稱為「穩定同位素」，所以並不是所有同位素都具有放射性。也有一些元素本來並沒有放射性，但為了科學上的需要，而以人工的方法特地製造出放射性同位素，比如用中子束撞擊鋁-27原子，就會變成有放射性的鋁-28了。

放射性同位素將放射質點或能量逐漸釋出就變成沒有放射性了，這個過程叫「衰變」。不同放射性物質的衰變速率有快有慢，在科學上用「半衰期」來表示衰變的快慢，所謂半衰期就是放射性物質的放射性衰變到只有當初一半強度所需要的時間。因此，半衰期越長就表示要衰變到原來的一半強度所需要的時



間越長，比如說鈾-238的半衰期是45億年，可見它的衰變是極慢的。又如鈾-46的半衰期只有0.006秒，它的衰變就極快了。

## 放射線強度的單位

各種放射性同位素會放出幾種不同形式的放射線，分別以希臘字母來命名，例如 $\alpha$ 射線、 $\beta$ 射線、 $\gamma$ 射線等。放射線的強度是以放射源每秒鐘發生衰變的分子數目（disintegrating per second, dps）來計量，單位為居里（curie）。1居里等於 $3.7 \times 10^{10}$ dps。

大部分放射源的放射強度遠小於鐳，故常以「毫居里」（millicurie，簡寫為mc）或「微居里」（microcurie，簡寫為 $\mu c$ ）為單位，強度分別為 $3.7 \times 10^7$ dps與 $3.7 \times 10^4$ dps。

這個單位完全是以放射源的衰變頻率為考量，在一九三七年的國際放射學會中，討論改由被照射物的立場來考慮，另訂放射強度的單位。會中決議以「倫琴」（roentgen）作為放射強度的計量單位，它是以X-光或 $\gamma$ 射線能使0.001293克（即在攝氏零度及1大氣壓下，1立方公分空氣的重量）乾燥空氣解離而產生1靜電單位（esu）的電量時的放射強度定為1倫琴，相當於每克空氣吸收了84爾格（erg）的能量。

但是這個單位並不太實用，因為它侷限於X-光與 $\gamma$ 射線兩種放射線，而且只能在空氣中使用，更重要的是放射線最大的破壞性是它們有解離與穿透的能力，而這兩種能力會隨放射線的種類而異。例如強度為1居里的 $\alpha$ 射線，每秒鐘能使空氣產生約100個離子對，而同樣1居里的 $\gamma$ 射線，只會產生1個離子對； $\alpha$ 射線連一張紙都穿不透，而 $\gamma$ 射線要10公分厚的鉛板才能擋得住。所以如果只討論被照射物吸收到的能量，而不考慮放射源破壞性的差異，是不切實際的。

到了一九五四年，開始採用「雷得」（rad）與「倫目」（rem）這兩個單位，每克被放射源照射的物質吸收了100爾格的能量，定義為1雷得。倫目這個單位就複雜一點，它除了要考慮被照射物從放射源吸收到的能量外，更要考慮到各種不同放射源破壞力的不同。放射源對生物體破壞力大小是以「相對生物效應」（relative biological effectiveness, rbe）來表示，它是個相對數值，以 $\gamma$

射線的rbe為1， $\beta$ 射線也是1， $\alpha$ 射線則為10。「rem」這個字是由「roentgen equivalent to man」的三個字的第一個字母拼起來的，它的定義是

$$\text{倫目 (rem)} = \text{雷得 (rad)} \times \text{相對生物效應 (rbe)}$$

這個單位把從放射源吸收的能量大小，與各種放射源危害程度的不同一併考量，相對的就合理多了。另外有一個相關的名詞叫「最大容許劑量」（maximum permissible dosage, mpd），就是一年之內一個成年人能忍受放射線照射的最高量。對健康的成年人來說，mpd是5 rem，也就是說一個成年人一年之中累積接受到的放射總量，若不超過5倫目是沒甚麼危險的。

放射線對其他物質可產生特殊的物理與化學效應，這可說是放射性同位素的特有性質。這種性質在工業、農業、醫療等方面頗有應用價值，也是第二次大戰以來幫助科技顯著進步的功臣之一。以鈾-60放射性同位素（半衰期5.27年，放出1.17百萬電子伏特，及1.33百萬電子伏特能階的 $\gamma$ 射線）來說，它會發出甚強的 $\gamma$ 射線及微量的 $\beta$ 射線。它放出的 $\gamma$ 射線在工業上非常有用，幾千居里或幾萬居里的鈾-60金屬元素可放出幾萬或幾十萬倫琴的輻射強度，而可引起各種化學反應，如聚合反應、氯化反應、氫化反應、磺酸化反應、氧化反應等。以下簡單介紹幾種應用的例子。

## 高分子材料的品質改良

很多高分子材料，如木材、竹材等天然纖維物質（天然高分子材料）或各種合成塑膠及合成纖維（人工高分子材料），可利用此種強大 $\gamma$ 射線的照射引起各種接枝反應或交聯反應，而改良這些材料的性質，以適合我們使用上的需求。如不耐熱的聚乙烯塑膠（融點約攝氏100度）經過照射後可引起分子間的交聯反應，而產生網狀結構的高分子，可使它成為堅硬又具耐熱性的聚乙烯，最高可耐熱到接近攝氏300度，可代替各種機械零件及耐腐蝕性的器材使用。

排水性甚強的塑膠及合成纖維，可以經由 $\gamma$ 射線的照射，與帶有親水性的化學基（如一OH， $-\text{SO}_2\text{OH}$ ， $-\text{COOH}$ ）的化學成分產生接枝反應，以得到親水性的塑膠（如塑膠製隱形眼鏡）或合成纖維。相反地，親水性過強的棉織品也可接枝具排水性的化學基，而減低其親

水性。在工業上應用放射線照射引起接枝反應所得產品的實例不少，如不易染色的合成纖維，利用接枝反應使該纖維具有易染性；將易產生靜電的合成纖維，改良為不產生靜電的纖維產品；免燙衣服的照射加工等。

木材的纖維間有很多空隙，尤其是在亞熱帶成長快速的木材，質地不夠堅實。如果把木材浸泡在適當的液態高分子單體中，因為毛細管現象使這些高分子單體進入木材的纖維空隙中，再用適當劑量的 $\gamma$ 射線照射，即可引起木材中高分子單體的聚合反應，而得到不變形、不龜裂、防蟲害、機械強度甚強的木塑材新產品。目前工業技術研究院的化學工業研究所已從事這方面的服務工作，並以這種新產品供應工業界。

放射線也應用在化學工業上，如將二氧化硫（ $\text{SO}_2$ ）與氧（ $\text{O}_2$ ）氣體通過直鏈石蠟液，經由 $\gamma$ 射線照射產生磺酸化反應，即可製造一種可被細菌破壞分解，不致產生永久泡沫的清潔劑。其他的應用，如有機化合物的氯化反應以製造氯化物、不須加壓及觸媒的氯化反應以製造飽和化合物等製程，已有部分工業化。汽車車體的烤漆、電線電纜的塑膠電線表面被覆處理等，如改用放射線照射處理，不須加熱，及使用溶劑，生產效率比其他方法都要高，製造成本亦低。在歐美汽車工業或電線電纜工業界中，已有近半的業者採用放射線照射加工處理法了。

## 工業材料或成品的非破壞式檢查

所謂非破壞式檢查，是不破壞試驗材料，而檢查材料內部結構有無瑕疵的檢查方式，在工業上的應用十分重要。過去大都是用X-光照相術進行非破壞式檢查，但工業用的X-光照相機價格昂貴且笨重，不易任意攜帶到各個使用地點。如使用鈷-60或鈦-197（半衰期74天）放射性同位素照射源代替X-光機器，則攜帶方便且無須大量電源，全套設備價格也很低廉，極具實用價值。目前在我國造船業、鋼鐵工業、化工業裡，已逐漸使用這種方法取代以往的X-光照相機進行非破壞式檢查。

## 追蹤法

利用放射性同位素的放射性極易被偵測與計量的特性，可將其做為「追蹤劑」而應用在製造工程、產品分析、品質控制方面。化學工廠各種反應器內的反應分布

狀態檢查，熱交換機內的熱交換現象的解析或洩漏檢驗，或自動控制系統中密度、流量、液面高等的控制，皆是追蹤法的應用實例。

引擎是汽車的心臟，必須要能耐磨，所以引擎的活塞環磨損程度的檢查是非常重要的。傳統的檢查方法需時約500小時，採用放射性追蹤法檢查就只要6小時。它的原理很簡單，先做一個測試用的樣品引擎，製造時在原料中摻入已知量的放射性物質，讓這個樣品引擎運轉6小時後，檢查放射性強度減少的量，就可以換算出活塞環的磨損程度。汽車輪胎的耐磨里程數，也可用類似的放射性追蹤法測試出來，省時又省錢。

## 中子活化分析

在電子工業中，極高純度的矽是最重要的原料，所以矽原料中微量不純物含量的檢驗是非常重要的。在諸多微量分析方法中，中子活化分析是最靈敏準確的。此法將微量待檢驗材料放置在原子爐中，以鈾燃料放出的中子束加以撞擊，使這些材料的原子轉變為放射性同位素，這個過程稱為活化。將活化過的試樣取出經過化學處理後，再用多頻脈波高度分析儀進行檢定，就可獲得從前無法得到的極微量元素的分析結果，精密度可以比色層法、光譜法、質譜法等高十倍以上。

## 工業測定儀器方面的應用

可利用 $\beta$ 射線或 $\gamma$ 射線在物質表面的吸收、散射或反射的原理，而設計出測定物質密度、厚度、液面高度的方法，並且可組成整套的測定儀，以便在生產過程中配合自動控制系統使用，此種方法省時、省工、正確、安全可靠極有經濟價值。在一九八九年美國的一家苛性鹼化工廠提出報告，該廠使用放射性同位素測定儀器測定氯化鉀、氯化鈉飽和溶液的密度，在人工方面每年可節省25,000美元；又可減少廢料處理用水而節省原料成本約30,000美元，並且產量同時增加10%，純利多出25,000美元，令人驚訝的是裝設這套自動控制測定儀器的費用，僅僅只有900美元而已。 □

郝俠遂

淡江大學化學系