

工業 X 射綫 探 傷 基 础

龔再仲、廖少葆編著

机械工業出版社

88

工業 X 射綫探伤基础

龔再仲、廖少葆編著



机械工业出版社

出版者的話

X射綫探伤法是材料和机器零件無損檢驗方法之一。这种方法在机器制造业和其他工業部門的应用日益广泛。

为了使讀者能对X射綫探伤工作有一个較全面的了解，以便作为实际开展X射綫探伤工作的基础，中国科学院机械电机研究所編写了「工業X射綫探伤講义」，供有关工作人員参考，并在此講义的基础上由龔再仲、廖少葆兩同志加以整理而成此書。

本書內容包括X射綫探伤的原理、裝置和方法。書中除了对上列各項作了一般地介紹之外，同时还重点地介紹了几种国内常用的X射綫探伤設備和最常应用的照像方法以及目前国外在X射綫探伤方法上的新趋势，如光敏半导体成像記錄法、快速X射綫照像法和高能X射綫探伤法。最后还討論了X射綫探伤在工業上的应用和X射綫的防护問題。

本書的編写是考虑到理論和实际的結合，但偏重于实用技术，适于有关工程技術人員参考，也可供大專学生参考。

NO. 1401

1957年7月第一版 1957年7月第一版第一次印刷

850×1168^{1/32} 字數 245 千字 印張 9^{11/16} 0,001—1,800册

机械工業出版社(北京东交民巷27号)出版

机械工業出版社印刷厂印刷 新华書店發行

北京市書刊出版業營業許可証出字第 008 号

定价(10) 1.80 元

目 录

前言	7
第一章 緒論	9
第二章 X射綫及其發生	14
1 X射綫及其性質概述	14
2 連續 X射綫	16
3 標識 X射綫	21
第三章 X射綫的減衰	25
1 X射綫的吸收与散射	25
2 X射綫的減衰律	29
3 減衰系数及其計算	31
第四章 X射綫管	42
1 X射綫管的两种基本类型	42
2 X射綫管的陰極	43
3 X射綫管的陽極	44
4 X射綫管的焦点	47
5 X射綫管的真空度	50
6 X射綫管的特性	51
7 X射綫管的保护罩	54
8 X射綫管的冷却系統	55
第五章 X射綫裝置的高电压發生設備	57
1 無高压整流管的半波自整流綫路	57
2 有高压整流管的半波整流綫路	58
3 有高压整流管的桥式全波整流綫路	58
4 具有脉动电压的倍压綫路	59
5 具有恒定电压的倍压綫路	61
6 高电压發生器的結構	62
7 主要变压器	64
8 高压整流管	68

9 加热变压器	70
10 高压电容器	72
11 高压电缆	73
12 X 射线管陽極电流的測定	76
13 高电压的測定	77
第六章 X 射线裝置的操縱台	80
1 电压的調整設備	80
2 X 射线管和整流管的加热調整設備	84
3 开关設備	84
4 時間控制器	87
5 电压穩定器	88
6 保护設備	90
7 X 射线裝置的电源	93
第七章 常用的几种工業X射线探伤裝置	94
1 苏联出品的 PYII-1M2 型工業用X射线探伤裝置	94
2 捷克出品的 MAKROPHOS 250 型工業X射线探伤裝置	98
3 匈牙利出品的 M3V 型工業X射线探伤裝置	101
第八章 X 射线照相方法	103
1 决定照相的部位和編号	103
2 照相方法的选定	107
第九章 軟片的攝影作用	120
1 軟片及其攝影作用	120
2 照相底片的攝影密度	123
3 軟片的特性曲綫	126
第十章 螢光作用与增感作用	137
1 螢光現象与螢光物質	137
2 螢光增感	138
3 增感屏的选用	142
第十一章 曝光条件的有关因素	148
1 X 射綫的硬度	148
2 X 射綫的曝光量	151
3 散射线	154

4 照相方法的灵敏度	157
5 曝光曲線的制作	165
第十二章 軟片的暗室处理	169
1 显影作用和显影剂	169
2 定影作用和定影剂	180
3 底片的水洗和干燥	184
4 軟片的儲存	186
第十三章 X 射綫底片上缺陷影像的辨認和推断	188
1 实际缺陷和其在 X 射綫底片上的影像	188
2 在鑄件的 X 射綫檢查中常發現的几种缺陷	190
3 在焊件的 X 射綫檢查中常發現的几种缺陷	198
4 銅鉛合金軸承中的几种缺陷	203
5 X 射綫底片上的伪缺陷	205
6 缺陷位置的測定	209
7 板的厚度測定	212
8 X 射綫透照結果的推断	213
第十四章 高能 X 射綫探伤	219
1 高能 X 射綫的特性	219
2 共振变压器式高能 X 射綫裝置	224
3 靜电起电机式的 X 射綫裝置	228
4 电子迴旋加速器式 X 射綫裝置	230
第十五章 快速的 X 射綫照相	234
1 脉冲电流 X 射綫透視照相	234
2 活动影像的 X 射綫照相	236
第十六章 螢光观察法	238
1 螢光屏直接观察法	238
2 电子螢光观察法	246
第十七章 电离探测法	250
1 X 射綫的电离作用与电离探测仪	250
2 X 射綫的剂量單位及其測量	254
3 缺陷与厚度的电离探测法	257
第十八章 光敏半导体成像記錄法	261

1 光敏半导体成像记录的简要原理	261
2 半导体静电图形法	262
3 光敏半导体电视成像法	270
第十九章 X射线探伤在工业上的应用	272
1 X射线探伤的目的	272
2 X射线探伤的用途	279
第二十章 X射线的防护	287
1 X射线对人体的影响	287
2 人体对X射线的容许剂量	288
3 防护方法与防护材料	290
4 防护检查	297
第二十一章 X射线探伤试验室	290
1 试验室的建立	290
2 X射线探伤的记录档案	303
参考文献	310

前 言

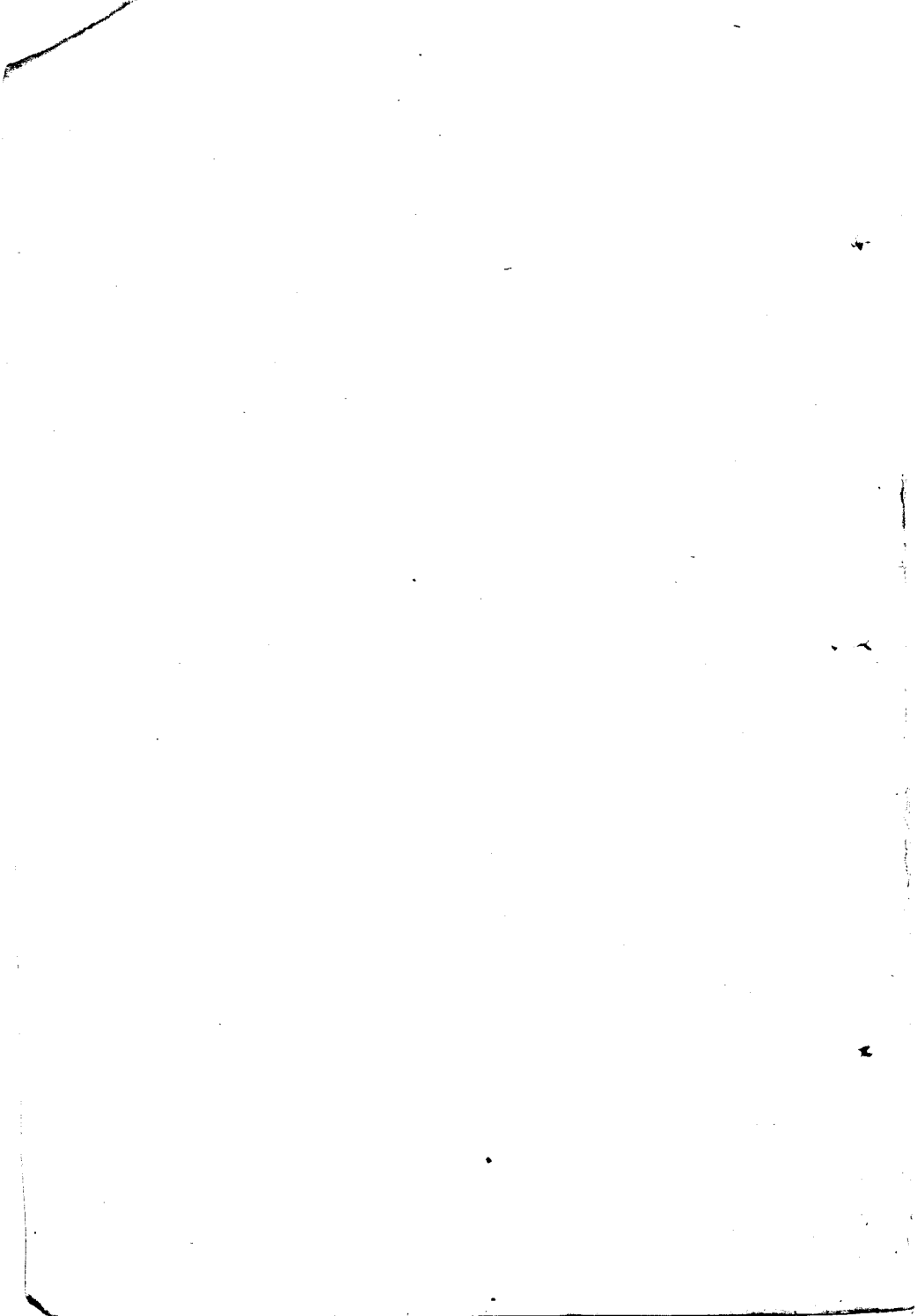
本書是在〔工業X射綫探傷講義〕的基礎上加以整理編寫而成，原講義曾經過兩次編寫，作為中國科學院機械電機研究所召開的〔X射綫探傷學習會〕教學之用。由於以前的油印本所存不多，遠不敷有關單位的需要，因此我們決定在原講義的基礎上重加整理，刪去一部分不必要的內容，再添入一部分新的材料，公開出版，作為大學有關專業學生和工業部門有關工程技術人員參考之用，以及X射綫探傷工作者學習之用。

本書主要討論了X射綫探傷原理、裝置和方法，在探傷方法中重點討論了照相法，而對螢光觀察法和電離探測法只作了簡要的敘述，又對一些新的方法作了一般的介紹。這些內容的構成，主要是參考國外有關書籍和雜誌，再通過我們的經驗，根據需要情況加以整理而來。在有些章節中是綜述的，有些是節譯的，因此這本書是否合乎要求，或其中存有錯誤之處，尚希讀者多加指正。

本書在這次編寫中，第二、三、十六、十八、二十章是由龔再仲同志負責，第九、十、十二、十七章由龔再仲、廖少葆兩同志負責，其餘各章由廖少葆同志負責。全書總的編排由廖少葆同志負責，最後由龔再仲、廖少葆、朱雲青三同志校閱；其次在本書中的照片攝制方面由朱雲青同志負責完成，在繪圖方面，丁安華同志也盡了很大的努力。

在以往幾次講義編寫過程中，韓朔、毛振琮、龔堯圭、黃本立等同志以及其他有關同志曾予以協助並供給我們一部分資料，在此一併致謝。

編者



第一章 緒論

1895年11月德国渥茨堡大学教授倫琴 (Röntgen) 在研究陰極射綫時，發現了一種新的不可見的射綫，它能透過人手而使在塗有鉛氰化鋇的紙板上顯出手骨的螢光影像。當時對這種射綫的性質還不清楚，倫琴就稱其為「X 射綫」。現在英美等國仍用此名，而在蘇聯、德國等國則稱為「倫琴射綫」。

此射綫發現不久後，即用在醫療的簡單診斷上，也用在一些特殊的非金屬制品的鑒別上。因為當時 X 射綫管只是冷陰極的，電壓使用得低，所發生的射綫波長很長，穿透力很小，所以使用的範圍很有限。但當熱陰極 X 射綫管發明後，在 X 射綫管兩端可加上高電壓，這就將其使用範圍擴大到工業產品上。此後世界上工業先進的國家都逐漸使用，蘇聯是首先利用在航空工業上。在這段時間內經過蘇聯學者和工程師們在研究和推廣上不斷的努力，現在蘇聯在有關工廠里都已普遍地使用了這種射綫來探傷。在英美等資本主義國家也不斷地設計出各種 X 射綫探傷裝置及其有關設備，大多成立了專門學會和發表不少的資料。而我國在解放前，由於工業落後，這種技術是完全沒有基礎的。在解放後，隨著國民經濟建設迅速的發展，對 X 射綫探傷的要求也提到一定的程度。為此，中國科學院機械電機研究所曾舉辦了兩次 X 射綫探傷學習會，邀請全國有關工業部門試驗所、工廠和有關學校來參加，以便全面地推廣此項技術，並與有關單位建立經常的直接聯繫。幾年來經過各方面共同努力，現在我國很多有關工廠和試驗室以及有關學校都建立起 X 射綫探傷試驗室，並且在某些方面已取得很好的成就。有些工業部門組成了 X 射綫探傷工作組，直接下廠協助工廠建立試驗室，制定工作方法和制度，已取得了顯著的成果。尤其是在配合焊接方面更為突出，不但建立了焊接 X 射綫探傷方法，而

且和焊接技术工作同志密切結合提高了焊接技术。現在还不断地在配合焊接和鑄造方面作进一步深入和广泛的开展,將来的成就是可以預料的。

X 射綫探伤是基于物質对 X 射綫的影响和 X 射綫对物質的作用。具体的來說,X 射綫探伤的作用系統可以分成三部分如圖 1 所示,即: X 射綫源、被檢查物和驗定器材(如軟片、螢光屏等)。

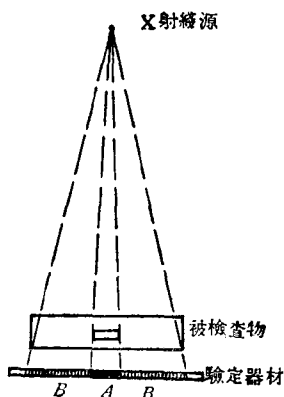


圖 1 X 射綫探伤作用系統示意图。

当 X 射綫通过被檢查物时,因物体内部和外部的構成和形状的不同而有不同的吸收,以致有不同的減衰,因此通过被檢查物后得有不同强度的 X 射綫。如在圖 1 中 A 处的 X 射綫强度就比 B 处为大,这就可以影响作为驗定器材的某些特殊物質引起不同的变化,再通过一些方法把这些变化描述出来,即可作为对于这些被檢查物的判断根据。依驗定器材的不同,則 X 射綫探伤法可分为透視照相法、螢光观察法、电离探测法和其他几个新的方法等。因为透視照相法灵敏度較高,所以这种方法是工業上常用的,也是最普遍的。因此在这本書里將以討論这种方法为重点。

在 X 射綫源方面,我們除了應該了解 X 射綫發生的原理外,同时也應該了解發生 X 射綫的設備,即 X 射綫探伤裝置。因为我們不但在工作中首先要接触到这种工具,就是說首先要把 X 射綫裝置安裝起来,同时也是經常要接触它的,所以就必須了解它和熟悉它,这样才能保證工作的順利开展和有效的利用。本書中对于 X 射綫裝置着重地叙述了現在常用的設備構造,即在 200 仟伏以下的裝置,如圖 2 所示。但我們把其基本構造分成三部分来討論,即 X 射綫管、高压發生設備和操縱台;而把冷却部分合并在 X 射綫管部分討論,把有关高电压部分合并在高压發生設備中討

論,把低电压部分都放在操縱台中討論。

由于工業的迅速發展,工業产品不断地改进,不断地試制出很多新产品,同时新的工艺方法也不断地出現,所以对探伤的要求也日漸特殊而复杂。因此我們学习X射綫探伤,如果仅了解其原理,那是非常不够的,我們还應該知道其应用,而且不但要知道国外如何在应用,同时也要了解在自己工作範圍內應該如何去有效地利用,如何去配合国家經濟建設,配合生产單位的工作,發揮其最大效用。我国的經濟建設正在一日千里地蓬勃發展着,工業技术應該赶上發展的要求,所以我們不但要把国外已成熟的經驗适当地运用到工作中来,

而且更主要的是要深入到生产中去,發現应用这种技术的对象,創造性地应用这种技术,这就是我們現在很重要的工作。

X射綫探伤是無損探伤方法之一,所以在發展X射綫探伤工作时,也得考慮到其他無損探伤方法。因為我們知道要有效地、正确地解决一个探伤的問題,不能專靠一种探伤方法。各种探伤法各有其优点,也有其缺点。例如X射綫探伤的优点是無論被檢查物的材料是非金屬和金屬都可以檢查,那就不像磁法探伤只能限于鉄磁材料。X射綫探伤不受被檢查物的結構形式和表面光滑程度的限制,而磁法和超声波法只能在外形簡單、表面較光滑的情況下有利。尤其是X射綫能窺測机件內部的复杂構造,这是为其他探伤方法所不能的。但X射綫探伤也有缺点:对于大鍛件上的毛髮裂紋的檢查是非常困难的,X射綫的穿透能力随电压的高低而定,在200仟伏的X射綫裝置可透視7公分厚的鋼,在2000仟伏时可檢查30公分厚的鋼,而要用高能电子迴旋加速器所發生的X射綫才能穿透50公分厚的鋼,所以在裝置設備上就不如磁法和

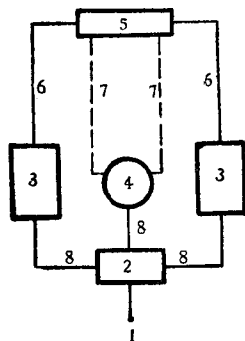


圖2 X射綫裝置構成
示意图:

- 1—电源; 2—操縱台;
- 3—高压發生器; 4—冷却
- 油泵; 5—X射綫管; 6—
- 高压电綫; 7—冷却油管;
- 8—低压电綫。

超声波法的设备灵巧。用超声波法探测大锻件中的夹层、裂缝,以及用磁法探测大锻件,大铸件的表面微细裂缝,要比 X 射线探伤有效得多。一般在 300 仟伏的 X 射线装置所能探测的缺陷,只能探测出被检查物在射线方面总厚度的 2% 的差异来。例如 5 公分厚的钢,只能探出其中 1 公厘厚的空气层来,而要用高能 X 射线装置方可在 5 公分厚的钢中探出 0.025 公厘的人工裂缝。其次在 X 射线探伤上鉴定设备是比其他探伤方法要复杂些,操作也比较麻烦些,同时还需要防护等设备,在费用上比较多些。关于 γ 射线探伤在很多方面和具体问题上和 X 射线探伤是完全相似的,不过也各有其优缺点。例如作为 γ 射线源的放射性同位素价格便宜,使用也方便,但就不如高能 X 射线探伤的灵敏度高和曝光时间短。当然现在关于和平利用原子能的问题是科学上一个大问题,我们应该注意到 γ 射线探伤的问题,不过这已有专书讨论,此处不再叙述。总之当我们进行探伤工作时应该全面地考虑各种探伤方法,看哪一种方法最有效,要取各方法的所长,相互配合使用。所以当我们推广 X 射线探伤工作时,一方面要尽量利用这方法的优点,创造性地加以运用,另一方面也不能把它当做是万能的,也应该考虑其他方法,有时还应该配合机械试验、金相试验、水压试验等方法,来共同取得可靠的结果。当然在有些方面 X 射线探伤是起主要作用或决定性作用的,但在另一些方面却是无能为力的。所以我们认为在工业部门推广时,应该成立专业的探伤小组来进行,是比较有效的。

在 X 射线探伤工作上,除了配合目前生产开展检验性的工作外还应该着重密切配合新产品试制、新技术创立等工作,因为只有在改进技术,提高成品率的过程中, X 射线探伤工作才是最有效的。探伤工作的最终目的不是在探出缺陷,而是在协助生产,改进生产技术来消灭缺陷的生成原因。我们知道工业愈发达,产品的类别愈多,新工艺方法也愈新颖,但缺陷生成的可能性仍然是存在的。因此我们的工作除了上述以外,还应该在探伤工作本身

的有关問題上开展研究工作，否則是赶不上需要的。产品类型愈特殊、愈新穎，产品的材料愈厚、外形愈大，則对探伤的要求愈严格。这就要求我們研究出穿透力强的、灵敏度高的、最适用的 X 射线装置，以及研究出特別方便、經濟而又灵敏的驗定設備。当有了新的設備和新的檢查对象时，則探伤技术就有了新的內容。当原有的探伤技术不能解决新的要求时，也一定会促使設備的改进。所以只有在研究新設備成功的基础上才能把探伤工作更推进一步，赶上实际需要。其次还得提出的是應該注意其他科学的新成就，适当地把它应用到我們的工作上，这也会促使我們的工作前进。現在当祖国正迈开大步向社会主义前进的时候，党号召我們向科学进军，要求我国的科学技术在十二年内赶上世界水平，这对我們是莫大的鼓舞，也是一件光荣的任务，我們應該發揮創造性和積極性来把这项工作广泛地有效地推广到有关生产部門里去，并且要迅速地提高我們的業務水平，研究出新的探伤方法，設計出新的工具来完成祖国和党交給我們的这一項光荣的任务。

第二章 X射綫及其發生

1 X射綫及其性質概述

X射綫与可見光綫、無線電波、紫外綫和 γ 射綫在本質上都是電磁波。所不同的,只是它們的波長各有不同,因此它們之間的性質也就有差別。各種電磁波波長分布的範圍如表1。

表1 各種電磁波波長的分布範圍

電 磁 波 的 種 類	波 長 分 布 范 圍
無 線 電 波	30 千公尺 ~ 0.3 公厘
紅 外 綫	0.3 公厘 ~ 7800 Å ^①
可 見 光 綫	7500 Å ~ 3900 Å
紫 外 綫	3900 Å ~ 200 Å
X 射 綫	1019 Å ~ 0.008 Å
γ 射 綫	1.139 Å ~ 0.003 Å

① Å 讀為「埃」,為光譜波長的單位。 $1\text{Å} = 10^{-8}$ 公分。

所謂電磁波就是當帶有電荷的物體以加速度運動時,它的周圍就產生了互相垂直的並因時間而變化的電場(E)與磁場(H),並且在整個空間里向各方向傳播出去,如圖3所示。傳播時,在某一瞬间振動情形相同的各點,都是分布在一系同心球面上,而且各種電磁波在真空內的傳播速度都一样,約等於 2.99×10^{10} 公分/秒,通常以 C 表示,也就是一般稱為光速的 C 。這速度(C)與振動頻率(ν)及波長(λ)之間的關係為:

$$\lambda = \frac{C}{\nu} \quad (1)$$

X 射線的波長, 从表 1 中可以
出, 它从紫外綫部分一直分布到 γ 射
綫的某些地方。在实用上, 应用 X 射
綫作物質的結構分析时, 常用的波長
在 $2.5\text{\AA}$ 到 $0.14\text{\AA}$ 之間, 在 X 射綫探
伤方面, 使用的波長一般在 $3.1\text{\AA}$ 到
 $0.006\text{\AA}$ 之間。在 X 射綫探伤工作

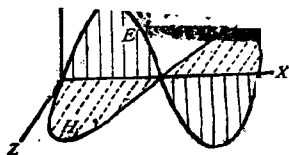


圖 3 电磁波的傳播示意图

中, 对 X 射綫波長的选择, 有很大的实际意义。因为 X 射綫波
長的大小, 便决定了 X 射綫穿透物質的能力。(如果所要檢查的材
料厚度愈大以及这种材料的原子序数愈高时, 所要求的 X 射綫波
長也就愈短。) 在檢查一定的材料时, 只有选择到适合的波長, 才能
得到滿意的結果。

关于 X 射綫的一般性質, 可概括地列举如下:

- 1) 不可見, 并依直綫方向傳播。
- 2) 不受电场或磁場的影响, 也就是它的本質是不帶电的。
- 3) 除电子 (或正离子) 撞击物質可产生 X 射綫外, 其他如在高
温星球的内部以及用电子迴旋加速器分裂原子时, 都可以产生
X 射綫。
- 4) 波長的分布是連續光譜型的, 其最短波長的限界由發生 X
射綫的电压决定; 同时也能产生綫光譜, 它的波長与組成对陰極
(即陽極) 物質的化学成分有关。
- 5) 如可見光綫一样, 有反射、干涉、繞射、折射和極化等現象。
- 6) 能使物質产生光电子及返跳电子以及引起散射現象。
- 7) 能被物質吸收, 而产生热量。
- 8) 能使某些物質起光化学作用, 能使攝影干板或軟片感光,
并能使某些物質發生螢光作用。
- 9) 能使气体电离, 也能影响液体及固体的电性質。
- 10) 能起生物效应, 伤害及杀死有生命的細胞。
- 11) 以晶体作为光栅使 X 射綫繞射时, 遵从吳里弗—布拉格

定律。

12) X 射綫与其他的射綫一样,同时具有波动与微粒的性質。在干涉、繞射这一类現象中, X 射綫特別显示出波动的性質,但在另一些現象中,如 X 射綫被單獨的电子所散射时,又特別表现出微粒的性質,这就是 X 射綫的二重性。

在 X 射綫的性質中,特別是 X 射綫通过物質时,物質对 X 射綫的減衰現象,以及 X 射綫对物質的光化学作用、螢光作用、电离作用、生物效应等等,对 X 射綫探伤工作都具有很重要的意义,因此这些性質都將在以后有关各章中加以討論。

2 連續 X 射綫

1 連續 X 射綫的發生 X 射綫發現以后,經過了很多的研究,証明它是这样發生的: 即一群具有高速度的电子 (陰極射綫) 与硬的物体相碰撞时,它們的运动便急剧地被阻止,也就是失去了它們所具有的动能,而产生了另一种形式的能量。其中大部分的能量轉換为热能,使物体的温度升高,另一部分便轉換为光能,即 X 射綫的能量。

X 射綫管是發生 X 射綫的主要設備,它的主要部分有: 1) 陰極,为产生电子的地方; 2) 陽極,又称对陰極或称作靶,由金屬制成,为电子与之相碰撞时而發生 X 射綫的地方。把陰極与陽極密封在一个玻璃制成的管球內,并將管內抽成高度真空,便形成了通用的 X 射綫管。

X 射綫探伤工作中一般使用的 X 射綫管如圖 4 所示。發生电子的陰極是由卷成螺旋狀的鎢絲構成,通电加热到灼热的时候,便放出电子来。如以陽極為正極性及陰極為負極性并加上高电压时,电子便得到很大的动能,由陰極飞向陽極靶,与之相碰撞,而發生了 X 射綫。

按照近代的理論,一切的射綫,包括可見光綫与 X 射綫在內,都同时具有波动和微粒的性質,在某些現象中, X 射綫特別表現