

焊縫 X 綫 檢 驗

马 铭 刚 编 著



机 械 工 业 出 版 社

用X綫檢驗焊縫能保證产品质量。这种方法，在我国工厂中已广泛应用。本书就是介紹这方面的知識，并舉了很多实例。书內实验資料是在上海鍋炉厂X光室同志們协助下整理出来的。

本书可供檢驗工作人員参考。

焊 縫 X 綫 檢 驗

馬 銘 剛 編 著

*

机械工业出版社出版（北京苏州胡同 141 号）

（北京市书刊出版业营业許可証出字第 117 号）

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 · 各地新华书店經售

*

开本 $787 \times 1092^{1/32}$ · 印張 $4^{3/16}$ · 字数 87 千字

1958 年 12 月北京第一版 · 1965 年 7 月北京第三次印刷

印数 4,301— 8,300 · 定价(科四) 0.45 元

*

統一书号: 15033 · 1517(1957)

目 录

第一章 X綫的获得及其性質.....	5
一 X綫的获得.....	5
二 X綫的性質.....	7
三 X綫的量.....	9
四 X綫的衰减.....	10
五 X綫对軟片的作用.....	13
第二章 X綫机及其維護.....	15
一 X綫發生装置中的主要部件.....	15
二 X綫机的綫路.....	22
三 X綫机的故障檢查.....	24
第三章 X綫檢驗焊縫的方法.....	26
一 試件的編号和定位.....	26
二 照射方向和部位的決定.....	28
三 攝片时軟片的安置.....	32
四 X綫机与試件的对准.....	35
五 增感紙与增感箔的使用.....	38
六 軟片的性質和选择.....	41
七 有关攝片質量的因素.....	48
八 灵敏度和透度計.....	65
九 缺陷的測定.....	71
第四章 軟片处理.....	80
一 显影、定影及冲洗.....	80
二 設備.....	86
三 軟片处理不当的缺点及原因.....	88

第五章 缺陷的辨認和評定标准.....	92
一 缺陷地位的辨認.....	93
二 缺陷性質的辨認.....	95
三 缺陷的評定标准.....	117
四 缺陷的記錄.....	121
第六章 X綫防御物的計算.....	122
附录 X綫檢驗及記錄程序表.....	129
参考資料.....	133

第一章 X綫的获得及其性質

工业上X綫檢驗金屬缺陷，是利用X綫透过各种物質的穿透力。而各种物質对X綫都有不同程度的吸收作用。一般說来，密度較大的物質吸收得多，密度較小的物質吸收得少。这样，当X綫照射到某一試件时，如果内部有缺陷存在（一般缺陷部分的密度总比試件本身材料的密度小），那末这一部分对X綫的吸收就要比其余部分小些，亦即透过的X綫就要多些。我們知道X綫也具有感光作用，能使照相軟片●乳剂膜感光，經過显影后产生一定的黑度，我們可以从照片上所产生明暗不同阴影来判断試件上的缺陷。

为了能很好地掌握X綫檢驗工业产品的技术，我們对于X綫的产生和它的性質，不能不有一个大略的認識。

一 X綫的获得

簡單地說，当高速度运动的电子撞击障碍物时，电子由于被急剧的阻止失掉了自己的动能，这动能的一部分就变成X綫能。因此，为了获得X綫，必须具备以下的条件：

1. 用某种方法得到一定量的自由电子。
2. 迫使这些电子在一定的方向上作高速运动。
3. 在其运动的途徑上設立一个能急剧阻止其运动的障碍物。

● 本書內“軟片”指未經显影的X綫胶片，“照片”則指已經拍攝并經過处理得到照像的胶片。——編者

在实际应用上，尤其是工业X綫探伤应用上，X綫都是从具有高度真空的X綫管所产生的。見示意图1。

管中阴極灯絲被电流燒紅發射电子（热电子效应）。如果阴阳極之間加上高电压，管的

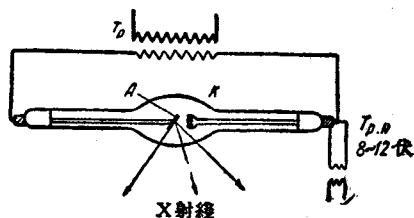


圖1 在电子管中获得X綫的示意图。

阴極电位較阳極為負时，这些电子在电场作用下就将奔向阳極。它們以高速度撞击阳極（又称对阴極或靶），进入很小的一个深度后，就被阳極面板材料的原子所阻擋而丧失动能。其大部分动能轉变为热能，仅有極小部分（約1%）則轉变为X綫。

X綫在本質上与普通的可見光綫相同。它与普通光綫只在波長上有区别，是电磁輻射的一种●，不带質量，不带电荷，因此不受任何电场或磁場的偏轉，它的波長范围約在 $1000\text{\AA}$ 至 $0.006\text{\AA}$ 之間（ $\text{\AA}=10^{-8}$ 公分）。但焊縫探伤上較常用的X綫波長范围約在 $1\text{\AA}$ 至 $0.01\text{\AA}$ 間，較普通可見光綫（波長的数量級是 10^{-5} 公分）約短数千倍，因此肉眼絕不能看到，并且不可能从磨光的表面反射。它从一个介質进入另一个介質时，和可見光綫一样也發生折射，然而折射系数与1相差很小，因此在很長的时间內不仅未曾測出，而且也未确定出有折射的事实。普通光学上用的繞射光柵不能使X綫产生繞射。但当它通过晶体时，就能观察到其离开一次入射

● 电磁輻射包括电波、无线电波、紅外綫、可見光綫、紫外綫、X綫、 γ 綫、宇宙綫等。——編者

方向作有規律的偏轉。不过这是屬於“X綫晶体分析”方面的，不在現在討論的範圍之內。

二 X綫的性質

根据量子学說，电磁波放射能的量子，乃从輻射源發出。量子的能量 (Q) 的大小，直接与其頻率 (ν) 成正比，用数学公式来写，就是

$$Q = h\nu \quad \text{或} \quad Q = \frac{hc}{\lambda}, \quad (1)$$

式中 λ ——射綫的波長；

c ——傳播的速度，亦即光速 (3×10^{10} 公分/秒)；

h ——蒲朗克常数 (6.62×10^{-27} 尔格秒)。

根据上述的关系，我們可以計算出加在X綫管二極間的电压 V 与其所可能产生X綫的最短波長 λ_0 的关系：

上面已經說过，X綫的能量是撞击阳極的电子失去动能后轉变的。我們知道，每一电子帶有一定量的电荷 e ($e = 4.803 \times 10^{-10}$ 靜电單位)。电子在电位差为 V 的电場作用下所具有的能量是 Ve ，而每一电子靜止时的質量 m 也是一定的。假設电子在撞击阳極前的速度是 v ，撞击后速度为零，而且电子的全部动能轉变为X綫能，那末可以写出下列的等式：

$$Ve = \frac{mv^2}{2} = \frac{hc}{\lambda_0}$$

从上式可以看出：加在X綫管兩極的电压愈高，則电子撞击阳極的速度愈大，所产生的X綫波長也愈短，穿透力也愈大。把各个常数代入后，可以算出：

$$\lambda_0 = \frac{hc}{Ve} = \frac{6.62 \times 10^{-27} \times 3 \times 10^{10}}{4.803 \times 10^{-10} \times 3.33 \times 10^8} = \frac{12.42}{\text{仟伏}} \text{ \AA}, \quad (2)$$

式中 V ——靜電單位； $V = \frac{\text{伏}}{300} = 3.33 \times \text{仟伏}$ 。

在这里我們說明了：X綫的穿透力（X綫的“質”），或者說X綫的“硬度”，決定于X綫的波長，也即決定于X綫管兩極間所加的電壓。

但是在實際應用上，加在X綫管兩極間的電壓是脈動式的（電壓每瞬息間有大小的變化），並且所有與陽極相撞的電子能以不同的方式滯止：其中有的在陽極表面停止，有的則深入陽極之內，在與陽極物質相撞時逐漸減衰其速度，在停止時所具能量已經是較小的了。這樣，電子就不會均以全部的動能，或以相等的動能轉為X綫能。所以事實上從X綫管出來的X綫，包括了從最長的波長直到最短的波長 λ_0 之間的各种波長，我們稱它是連續綫譜的射綫，或制動X綫，或“有色”X綫，正像太陽光包括了許多種不同顏色不同波長的光綫一樣。

與連續X綫相區別的，有不連續、具有綫型射綫譜的標識X綫（又名示性X綫）。這種射綫的波長僅決定于構成陽極材料的元素，而與管電壓無關。各種元素均有一定波長的標識X綫。而各種元素也需要一定的管電壓才能開始產生其標識X綫。在這激發電壓以下是不可能產生的。標識X綫的產生可以這樣理解：當撞擊陽極的電子具有足夠的動能，沖進陽極原子外殼，把陽極原子的最內層軌道 K （或其他層）中的電子“擲”出，就引起原子的不穩定狀態。為了恢復平衡， K 層（或其他層）的空位，必由距原子核較遠的鄰層電子來填充，這樣，電子從外層“跳”向內層，必定放出一定的能量，形成 K 系（或其他系）的輻射，亦即產生 K 系（或其他系）的X綫。這裡順便提一下：當X綫照射到某一物質

时，如果X綫的量子将这一物質原子中的电子逐出，也会产生这一物質的標識X綫，即通常称为二次標識射綫。標識X綫在工业探伤中并不重要。事实上，一般用鎢作为陽極的X綫管，当管电压在70仟伏以上时，所發出的射綫中包含了鎢的標識射綫。

三 X綫的量

現在我們再来討論X綫量的問題。

在一定的管电压，一定陽極材料的情况下，显而易见，从X綫管中所發射X綫的量是与撞向陽極的电子数成正比，也就是与X綫管中从陰極射向陽極的电子流 $\ominus$ 成正比。但是，上面已經講过，通常一束射綫包括了各种波長，如果細致地来測量对应于各种波長的射綫强度，那末X綫强度的分布情况将如图2的曲綫。

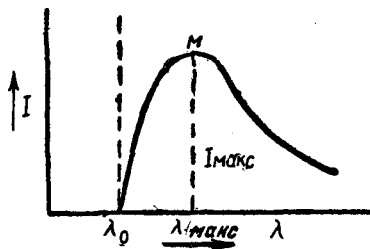


圖2 在連續綫譜中射綫强度的分布。

从圖上可以看出：一束含有各种波長X綫的强

度（就是照射处在單位面积中所受到的X綫量），对于各个波長來說，其强度并不是均一的，而是依照連續不同的波長作曲綫 $I_\lambda = F(\lambda)$ 的分布。因此其总强度 I 應該是曲綫和橫軸間所包括的总面积。

在曲綫上对应于最大射綫强度的波長值 $\lambda_{\max}$ 約为最短波

$\ominus$ 在習慣上把从陽極通向陰極的电流（与这电子流方向相反）称为管子流 i 。——編者

長 λ_0 的 1.5 倍。

当然，射綫的强度也与管电压 V 有关。在同一管电流下，管电压愈高，射綫的强度愈大。但是它們之間的关系不是成直綫的成正比。根据实验証实，射綫的强度与管电压的平方成正比，并且也与阳極材料的原子序数 Z 成正比。某地区的射綫强度，当然与該处距阳極靶的距离 F 的平方成反比。所以，总起来說，X綫的强度 I ，可以下列数式来表示：

$$I = \frac{KZV^2i}{F^2}, \quad (3)$$

式中 K ——常数，与仪器和度量單位有关。

四 X綫的衰减

当X綫通过物質时，它就失去一部分能量，这种現象称为X綫的衰减。这衰减是两个过程的结果：

1 吸收

吸收是一种能量的轉換。当X綫通过物質时，射綫的量子与物質原子的电子相互撞击，可以逐出与原子核联系較弱的电子脱离原子，亦即使原子离子化，并且其碰撞情况也可以不一样，有的量子在碰撞时消耗了全部能量，使逐出的电子带有頗大的速度，这就是光电子；有的量子則仅消耗部分能量。而这些被逐出的电子，速度較高的，可以超出被照射的物体以外，形成与阳極射綫相似的輻射。另一些电子与物質的原子碰撞时，将自己的动能变为热能（但是極微小，几乎不能測量）。如果入射的量子能够將原子内部的电子逐去，則又将产生二次示性X綫。总之，一次射綫在原子离子化及激發二次射綫上消耗一定的能量，这就是一次射綫的被吸收。

2 散射

散射的减弱是由于部分射线折向旁边，改变了原射线的方向。这种现象与光线通过浑浊媒介质时所受的散射完全相似。唯一的区别，就是X射线波长微小，任何对于光线透明的媒介质都成为“浑浊”，也就是物质的原子或分子本身成了散射的中心。

散射现象在物理学上的解释是：把X射线看作是一种电磁波，当它透过物质时，在这射线的电磁场作用下，原子的电子即发生共振。这“强迫振动”的频率应该与射入的X射线频率相同，而这种振动电子就变成散射到四方的电磁波波源，也就是说，射线发生了散射。但是事实上，散射线的波长除了与原入射线的波长相同外，还有一部分的散射线，它的波长较入射线略长些。在这种情况下，我们又要将X射线从“粒子”的看法来解释：入射线的量子与被照射物原子的电子相互作用时，把量子的一部分能量消耗在这些电子的“轨道脱出”及传给它们以附加速度上，因此也就改变了散射线的波长。

由于上述的过程，当射线通过物质时，随着贯穿行程的增長，射线能量也逐渐减少，显而易见，物质愈厚，则穿透过它的X射线减弱的程度也愈大。

射线减弱的程度不仅与透过的厚度有关，而且与射线的性质（波长）、物质的性质（密度和原子序数）有关系。一般说来，射线波长愈小，减弱的程度也小，物质的密度及其原子序数愈大，减弱的程度愈大。但它们之间的关系并不是成简单的直线比例。如果要进一步的了解，就需要了解X射线的能量衰减系数：

X射线通过物质后的衰减情况用数学方式来表示是这样的：假设入射线的强度为 I_0 ，通过物质的厚度为 d ，设想在

这厚度間分成无限多相等厚度的薄層，X綫通过第一薄層后的强度为 I_1 ，而 I_0 与 I_1 的比值假設是 m ，現在第二薄層的入射强度为 I_1 ，通过后的强度为 I_2 ，比值也應該是 m 。通过 x 層后的射綫强度 I_x 与 I_0 的关系应如下：

$$I_1 = I_0 m;$$

$$I_2 = I_1 m = I_0 m^2;$$

$$\dots\dots\dots$$

$$I_x = I_{x-1} m = I_0 m^x。$$

m 是常数，如果用 $\frac{1}{e^\mu}$ 来代 m (e 是自然对数底值 ≈ 2.72)，則

$$I_x = I_0 \left(\frac{1}{e^\mu} \right)^x = I_0 e^{-\mu x}。$$

此处 μ 的数值就被称为X綫能量衰减系数。显然，X綫通过厚度为 d 的物質时，透过后的强度：

$$I_d = I_0 e^{-\mu d}, \quad (4)$$

上面已經說过，X綫的衰减是由于吸收和散射而發生的，那末衰减系数 μ 就應該是吸收系数 τ 及散射系数 σ 的总和。即

$$\mu = \tau + \sigma$$

因为物質密度愈大，射綫在其路徑上碰到的原子也愈多，因而射綫也愈减弱，为了便于比較起見，通常采用所謂質量衰减系数 $\frac{\mu}{\rho}$ ，此处 ρ 是物質的密度。那末

$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{\tau}{\rho} + \frac{\sigma}{\rho}, \quad (5)$$

式中 $\frac{\tau}{\rho}$ ——質量吸收系数；

$\frac{\sigma}{\rho}$ ——質量散射系数。

質量散射系数由下述公式确定：

$$\frac{\sigma}{\rho} = 0.4 \frac{Z}{A}, \quad (6)$$

式中 Z —— 元素的原子序数；

A —— 元素的原子量。

質量吸收系数由下述实验公式予以相当准确的确定：

$$\frac{\tau}{\rho} = \frac{C}{A} Z^4 \lambda^3, \quad (7)$$

式中 C —— 常数；

A —— 元素的原子量；

Z —— 元素的原子序数；

λ —— 射线的波长。

当X射线透过重元素物质时（轻元素和很短波长的射线除外），射线的衰减主要是由于吸收作用，由散射而形成的衰减甚至可以不计。在很多的计算中可以采用

$$\frac{\mu}{\rho} \approx \frac{\tau}{\rho} \approx \frac{C}{A} Z^4 \lambda^3. \quad (8)$$

五 X射线对软片的作用

X射线射到软片上能引起软片乳剂膜的溴化银分解，这点与普通光线相似。不过，一般光线主要地只在乳剂膜的表面引起光化反应，而X射线由于有较大的穿透力，能够沿着整个乳剂膜的厚度均匀地引起溴化银的分解，同时在胶层内有一部分能量被吸收（约有1%的射线被吸收）。为了缩短曝光时间，X射线软片上的乳剂膜就涂得较厚，并且在软片的两面均涂上乳剂膜。

软片在显影后，溴化银被还原成黑色银粒子，因此照片在吸收X射线多的地方黑度就大。这就是感光作用。

照片的黑度是随着显影时所还原的金属银的浓度而定。

我們以普通光綫透過照片來進行研究。假設光綫射到照片上的強度為 J_0 ，通過照片後的光綫強度為 J 。如 $J = J_0$ ，則此照片完全透明。但這是不可能的。光綫通過物質時總被吸收掉一部分。所以 J 總是小於 J_0 。 J 與 J_0 之比我們稱為底片的透明度， $T = \frac{J}{J_0}$ 。

設想把照片分成許多厚度相同的單元層。 $J_1, J_2 \dots$ 依次為光綫通過第一、第二……單元層後的光綫強度。則：

$$\text{第一層的透明度 } \frac{J_1}{J_0} = \frac{1}{n};$$

$$\text{第二層的透明度 } \frac{J_2}{J_1} = \frac{1}{n};$$

第一、二兩層合併後的透明度

$$T_2 = \frac{J_2}{J_0} = \frac{J_2}{J_1} \cdot \frac{J_1}{J_0} = \frac{1}{n} \cdot \frac{1}{n} = \frac{1}{n^2}。$$

同樣，三層合併後的透明度 $T_3 = \frac{1}{n^3}。$

對於 m 個單元層來說， $T = \left(\frac{1}{n}\right)^m。$

如果選擇這樣厚的單元層，使這層的透明度為 $\frac{1}{10}$ ，亦即 $n = 10$ ，則：

$$T = \left(\frac{1}{10}\right)^m \quad \text{或} \quad m = -\lg T。$$

因為每一單元層中單位面積含有某一定量的金屬銀，所以 m （層數）是與 m 層單位面積的總銀量成正比。既然照片的黑度由照片所還原的金屬銀的量而定，那末 m 的量可以用來代表照片的黑度。不過通常以字母 D 來表示照片的黑度。這樣，

$$D = -\lg T = -\lg \frac{J}{J_0}$$

亦即

$$D = \lg \frac{J_0}{J}。 \quad (9)$$

用文字來說，照片的黑度（或稱攝影密度）是射在照片的光線的強度與通過照片后的光線強度的比值的對數。

第二章 X 綫機及其維護

X 綫機的規格需要根據需檢驗的材料及其厚度來決定。

對於鋼材而言，20~30 公厘的鋼板需 110~125 仟伏；70 公厘則需 220~250 仟伏。圖 3 的曲線表示了這一點的概念。此外，X 綫機有移動式的、可吊式的、輕便式的，需要根據檢驗品的大小、形狀和檢驗的部位等來考慮選擇，務使 X 綫易于對准被檢驗的部分。

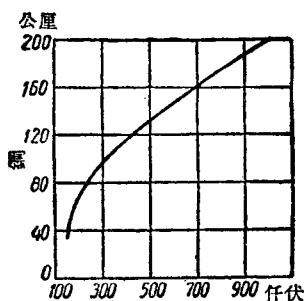


圖 3 各種管電壓下，鋼質物件許可透照的最大厚度。

一 X 綫發生裝置中的主要部件

X 綫的發生裝置，包括下列主要部分：

1. 產生 X 綫的 X 綫管。
2. 供給 X 綫管兩極高壓的高壓變壓器。
3. 控制 X 綫的操縱台。

1 X 綫管

X 綫管兩端可加的最高峰電壓不能超過其規定的仟伏數。最大的管電流與使用時的電壓數有關。

例如 Phönix-Grobstruktur-Röhre EWG 250/20ö 型 X 綫管的規格：

1) 阳極电压与电流的关系:

仟伏	250	200	150	100
毫安	15	18.5	25	37.5

2) 灯絲电压与电流的关系:

电流 (安)	最小电压 (伏)	最大电压 (伏)
5.4	5.8	—
6.0	—	7.0

使用X綫管时須注意不使X綫管过热。过热的原因可能由于(1)一次使用时间过长;(2)管电流太大;(3)冷却系統有問題。

新的X綫管在开始使用时須进行逐步加上高压和逐步增加管电流的“訓練”[1]。理由是:新管内可能存留有从管内金屬中释放出来的少量气体。当电子轟击这些残余的气体分子时会形成正負离子,正离子轟击阴極,增加灯絲温度;負离子随电子轟向阳極,增加管电流。正离子复与自由电子中和而又成为气体分子。如此周而复始,必致损坏X綫管。所以,当管电流超过額定时必須立刻停止。

X綫管阴極灼热的鎢絲具有少許吸气能力。如試驗新管时,电压和管电流能逐步上升,則管内各部分因温度上升而發出的少量气体,可能有足够的时间被吸收。管电流不会增大,保証用管安全。

久置不用的X綫管在开始使用时也須作相同的“訓練”。

新的X綫管如果在装入X綫机以前,要粗略地測定管内是否漏气,可以用一个高压發生器(約30仟伏,普通測驗絕緣油的耐压試驗器即可应用),通一个尖端電極至管的玻璃壁上,如果管内漏气,則管内將發生輝光放电現象。

过大的灯絲电流会燒断灯絲，并且因管电流过大而使阳極出气，损坏管内真空度，或熔化鎢的鏡面。

X綫管應該严防震动。其阳極甚重，而此重量仅借管端的玻璃支持，較易折断，在安装时务須注意。久用的X綫管，阴極鎢絲脆弱，一震即断，亦須注意。

X綫管如在規格范围以内使用，其寿命完全可以超出“全功率使用寿命”（1000小时）〔2〕。比如我們使用的X綫管，其实际平均使用功率約为全功率的70%，曝光的时间已經超过2000小时，灯絲燃燒时间則超过2500小时，仍能正常使用。

2 整流管

整流管与X綫管主要的区别如下：

- 1) 在阴極灯絲沒有起聚焦作用的装置。
- 2) 仅借輻射散热。
- 3) 两極間电压降比較小得多，仅数千伏。
- 4) 阴極發射电子量比X綫管大得多，所以阴極的鎢絲較長而粗。

当整流管两極間所加电压超过所規定的最高峰电压时，会失去其整流作用。整流管的灯絲电压必須校准至規定的数值（一般規格上所指明的电压伏数是指灯絲通有电流时，灯絲两端的伏数）。电压太高时会燒毀灯絲，电压太低时則鎢絲溫度低，發射的电子少，管内电压降大增，电子也像X綫管的电子那样，撞击阳極，这样，不但会产生軟性X綫，而且使阳極过热，形成玻璃的碎裂。

Phönix-Gluhventil V150/501Pö 型的整流管規格如下：