

高等學校教學用書

金屬X射線學

М. В. МАЛЬЦЕВ 著

梁志德 劉永銓 譯

高等教育出版社

高等學校教學用書



金屬 X 射線學

M. B. 馬里采夫著

梁志德 劉永銓譯

高等教育出版社

本書係根據蘇聯國立黑色及有色冶金科技書籍出版社 (Государственное научно-техническое издательство литературы по черной и цветной металлургии) 出版之馬里采夫 (М. В. Мальцев) 著 “金屬 X 射線學” (Рентгенография металлов) 1952 年版本譯出。原書經蘇聯高等教育部審定為高等礦冶學校非金相熱處理專業用教學參考書。可供冶金、機械製造等系教材之用。

本書對 X 射線的物理性質, 它的性能以及 X 射線發生儀器做了必要的介紹, 並且討論了常用的 X 射線晶體構造分析方法以及它們的使用。

參加本書翻譯和校對工作的為東北工學院冶金系金相熱處理教研組梁志德、劉永餘二同志, 最後經物理教研組白玉山 (教授)、金相熱處理教研組孫延烈 (教授)、王閣麟 (教授)、劉勤 (副教授) 四位同志組成之審核小組負責審閱。

金 屬 X 射 線 學

書號 93 (譯 88)

馬 里 采 夫 著

梁 志 德 等 譯

高 等 教 育 出 版 社 出 版

北 京 瑣 瑣 廠 一 七 〇 號

(北京市書刊出版業營業許可證出字第〇五四號)

新 華 書 店 總 經 售

京 華 印 書 局 印 刷

北 京 南 新 華 街 甲 三 七 號

開本 850×1092—1/28 印張 85/14 字數 185,000

一九五四年九月北京第一版 印數 1—2,000

一九五四年九月北京第一次印刷 定價 13,000

序

編著此書的目的，是爲了供給冶金和機械製造高等學校的大學生做爲X射線學普通教程的參考書用。

按照已定的任務，本書僅包括X射線物理學、結晶學及X射線裝置中的必需瞭解的材料；內容着重於X射線分析的方法，以及此法在解決個別金相學問題上的應用和在冶金機械製造與金屬加工工業中的技術操作過程的檢查上的應用。

在敘述X射線照像研究法的同時，還附有適當的例題來說明技術的計算。

著者不企圖將此課程中的一切基本問題均敘述詳盡，並懷着感激的心情，來接受對書中可能存在的缺點提出的意見和批評。

在編著本書的工作中，科學院院士 A. A. 波赤瓦爾和技術科學碩士突爾金講師的意見給予著者很大的幫助，爲此著者對他們表示謝意。

著者認爲自己有責向書報評論者——蘇聯校對局成員 C. T. 康諾別也夫斯基，博士 M. H. 扎哈羅娃教授，博士 Б. Е. 渥羅維克 教授，博士 Г. С. 丹諾夫教授，博士 Д. В. 戈戈別里札教授，博士 В. М. 羅文斯基教授，博士 В. И. 依弗羅諾娃教授，Г. Ф. 可索拉波講師，物理—數學科學碩士 A. A. 魯沙可夫以及此書的編輯博士 Я. С. 烏曼斯基教授致深切的謝意，因爲他們以非常寶貴的指示，幫助改善了此書的內容。

目 次

序.....	i
緒言	1

第一編 X 射線的物理基礎

第一章 X 射線的獲得及其本性	9
第二章 X 射線的最重要性質	12
§ 1. X 射線的反射和折射	12
§ 2. X 射線的衍射	12
§ 3. X 射線的電離效應	16
§ 4. X 射線對照像底片的作用	20
§ 5. X 射線的光激發效應	24
第三章 X 射線譜分析	25
§ 1. X 射線譜的組成及分解成譜線的方法	25
§ 2. 具有連續線譜的射線(制動X射線)	28
§ 3. 標識X射線	32

第二編 X 射線儀器

第四章 X 射線管	39
§ 1. X 射線管的構造原理和分類	39
§ 2. 電子X射線管	40
§ 3. 離子X射線管	48
第五章 X 射線裝置	50
§ 1. X 射線裝置的基本單元及其構造的特性	50
§ 2. X 射線裝置的典型構造與圖解	54
§ 3. X 射線實驗室工作的保護設備及技術保安	61

第三編 X 射線分析法及其應用

第六章 X 射線透視(X射線缺陷檢驗)	64
---------------------------	----

(ii)

§ 1. 方法的一般原理	64
§ 2. 記錄缺陷的照像法	70
§ 3. 透視的肉眼觀察法	86
§ 4. 用電離箱檢查缺陷法	88
§ 5. 透視法的應用	89
§ 6. 金屬的顯微X射線研究	94
§ 7. γ 射線透視法(γ 射線缺陷檢驗)	95

第七章 X射線晶體構造分析方法

§ 1. 方法的原理。X射線晶體構造分析方法的分類	97
§ 2. 晶體構造的普通知識(構造結晶學原理)	98
§ 3. 單晶體研究法、不動晶體法	111
§ 4. 多晶體物質研究法	116
a) 研究多晶體物質常用的方法(粉末法)	116
b) 焦集照攝法	145

第八章 X射線晶體構造分析法的應用

§ 1. 金屬及合金結晶構造的研究	154
a) 純金屬的結構	154
b) 固溶體的結構	156
B) 有序固溶體(超結晶點陣)	160
r) 化學化合物(中間相)	163
A) 共晶及其他類型的混合物	165
§ 2. 礦石、爐渣和其他在冶金上應用的材料的結晶構造研究	166
§ 3. 利用X射線晶體構造分析法研究相平衡圖	166
a) 合金的相的分析·合金相的定性分析	167
b) 確定相區的間界	174
§ 4. 金屬及合金塑性變形過程的X射線分析	180
§ 5. 利用X射線量度內應力	188
§ 6. 合金熱處理進行過程的X射線分析	194
a) 恢復和再結晶	194
b) 合金的淬火	199
B) 合金的回火(時效)	204

結語

附錄

金屬 X 射線學

緒 言

從發現 X 射線的時候起已過了五十多年了。在此時期內，X 射線的性質曾被詳細研究過，創造了獲得射線的各種不同的裝置，最後並擬定了一系列的研究方法，這些方法使得 X 射線能在各種不同的科學和技術範圍內被利用。

X 射線在醫學上的應用是衆所週知的。

當透視鑄錠、製成的零件和鉚縫時，爲了發現其中的縮孔、氣孔、裂縫及其他缺陷，人們採用了 X 射線。

X 射線在技術上這一廣泛的應用，稱爲 X 射線缺陷檢驗。X 射線缺陷檢驗在近代是檢驗產品及半成品質量的有力工具，並被廣泛地用來做爲檢驗技術操作過程個別階段的方法。

然而，X 射線的實際意義還不限於以上所指的應用範圍。由於 X 射線的一系列的優越性質，當研究結晶體的原子構造時（X 射線晶體構造分析），廣泛的利用它來定性和定量地確定各種不同物質的化學成分（X 射線線譜分析）及確定物質的組成（相分析）。

應用 X 射線晶體構造分析的方法可以確定微粒在固體中的（有時也確定其在液體中的）相互位置，而原子結構的確定，對於瞭解在研究結晶體的狀態變化時其中所發生的很多現象的物理性質，乃是一個很重要的因素。

X 射線在理論研究上也有同等重要的意義。關於原子的電子層的

構造，關於輻射的本質以及表徵物質與輻射的相互作用的若干重要規律等的最有價值和最深奧的知識的獲得，我們都應歸功於X射線。二十世紀的所有原子物理方面的發展與在物理學範圍內X射線的最重要的發現是密切相關的。

近年來，關於X射線的學說及其在各種不同領域的應用，已發展成為一門專門科學，被稱為X射線學。

在奠定X射線學基礎以及創造和完成使用方法與裝置上，俄國和蘇聯學者的工作起了卓越的作用。

還在X射線學未發展以前，剛開始知道發現了X射線時^①（在發現X射線後過了三個月），著名的俄國學者及無線電的發明家亞歷山大·斯捷巴諾維奇·波波夫就親手做了一個X射線管（為獲得X射線的儀器），在俄國的第一批X射線裝置中就有一個是他創造的^②。波波夫所首創的X射線裝置在克朗石塔德海軍病院中曾被為醫學的目的而應用過。

與A.C.波波夫同時，偉大的俄國物理學家莫斯科大學教授彼得·尼古拉維奇·列別捷夫，彼得堡大學教授伊凡·伊瓦諾維奇·保爾曼和軍醫學院教授H. Г. 也哥羅夫以及其他人也得到了X射線。A.C.波波夫曾暫時中斷了無線電技術工作，繼續研究X射線並做了特別的實驗，目的為了確定究竟是從工作管的那一部分發出X射線。結果他得出了完全正確的結論，即發出X射線的地方是管的發螢光的部分。

同時，在科學院物理室內著名的俄國物理學家和地球物理學家B. B. 戈里純對發射X射線的地方進行了詳細的研究，且以直接的實驗證明了X射線的基本發源地是不大的一個斑點（管的“焦點”），亦即陰極

① 還在樂琴的著作在俄國未發表以前，在1895年末許多科學雜誌上出現了他的詳細且足夠精確的實驗記載。就是這些記載被俄國的物理學家們、俄國X射線的創始者們在其尚未熟悉樂琴的基本著作以前已經開始利用了。

② В. Я. Штолев 論文集 “Люди русской науки” ОГИЗ 1948 第一期，143 頁。



亞歷山大·斯捷巴諾維奇·波波夫

(1859—1905 年)

俄國偉大的物理學家與電工學家。無線電的發明者。上世紀末在俄國他也是首先發現X射線並將其應用於醫學上的科學家之一。

射線(有方向的電子流)落到的地方,同時證實了關於X射線是由於將電子阻止在其途中某些障礙物上而發生的這個假說^①。

X射線在結晶體中的衍射的發現,是在X射線學及其研究方法的發展中一個新的巨大進步。首先關於利用結晶體做為天然的“三維的”對X射線的衍射柵的主張是在1910年被И.И. 列別捷夫所發表的。然而,由於他離開學校抗議沙皇政府的反動行為,致使他所提供的實驗沒能做到底。此實驗僅在1912年被物理學家勞埃所實現。

在發現此重要現象後經過一年,著名的俄國結晶學家和結晶物理學家格奧爾基·維克托羅維奇·吳立夫得出一個說明X射線在結晶體內衍射的最簡單的公式,同時奠定了結晶體的X射線研究以及X射線譜^②研究的基礎。

著名的俄國結晶學家,近代結晶科學的創始者,科學院院士耶夫格拉夫·斯捷潘諾維奇·費多羅夫^③在結晶學範圍內的發現大大地促進了X射線晶體構造分析和X射線線譜分析的發展。E. C. 費多羅夫所奠定的幾何結晶學的基礎,關於結晶體的對稱空間羣學說,是順利發展上述研究方法的基礎。

著名的俄國物理學家亞歷山大·格里戈里也維奇·斯托列托夫所發現的光電效應現象,對解釋X射線和物質相互作用的某些重要規律有很大的意義。

他根據光電效應的原理創造了名為光電管的儀器,在X射線技術中它被用來間接測量X射線的能量。

俄國及蘇聯的科學者們,在創造與改善X射線裝置中,也起了同樣

① В. В. Голицын А. Н. Карноушский 著 “О центрах исхождения и поляризации X-лучей” 科學評論, 28 號, 1896。

② 與吳立夫同時,此公式曾被英國人 У. Г. 和 У. Л. 布拉格所得到,因此在文獻中提到這個公式都用雙名,即稱為吳立夫-布拉格公式。

③ Е. С. 費多羅夫著 “Основы кристаллографии” 1891, СПб.

重大的作用。

由於使用俄國電工學家伊凡·費里波維奇·烏薩金早在 1882 年所發明的高壓變壓器來代替低能的感應圈，以及使用强有力的電子 X 射線管來代替低能的所謂離子 X 射線管，X 射線裝置製造業的高速發展才變為可能。製造電子管的主張是在 1910 年被 И. Н. 列別捷夫首先發表的。然而過早的逝世不允許他完成此重要的發明而電子管僅在 1913 年才出現。

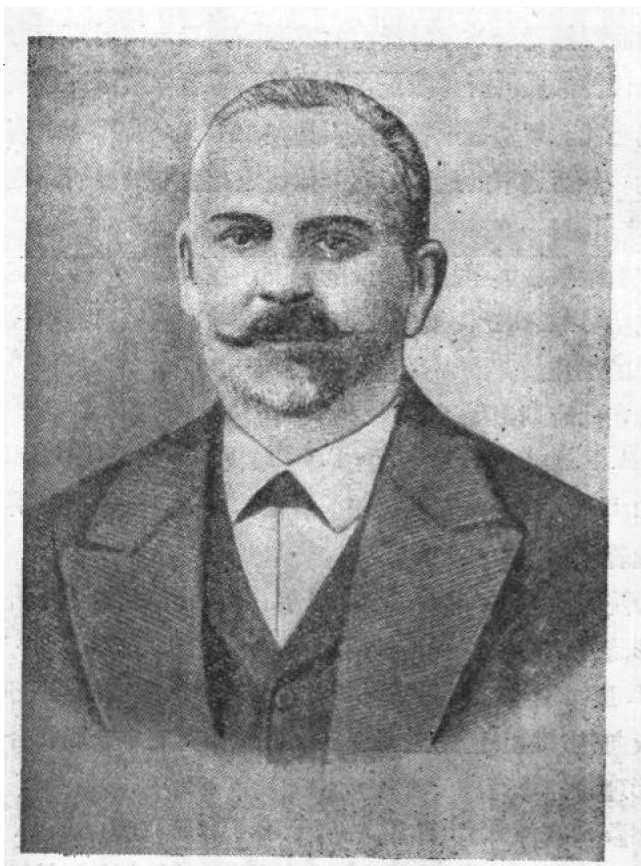
在 X 射線學發展中後一階段的特點，在於更進一步制定和改善 X 射線研究法，以及廣泛開展研究物質構造、X 射線輻射的本性及一系列其他問題的工作。

蘇聯在此時期出現了科學院院士 А. Ф. 岳費，С. Т. 康諾別也夫斯基教授，Н. Е. 烏斯平斯基教授，Г. В. 庫爾鳩默夫教授，Н. Я. 雪列可夫教授和 Н. Т. 古德錯夫教授在 X 射線結晶構造分析的範疇內所完成的第一批著作。

科學院院士 А. Ф. 岳費在 1921 年首先把 X 射線用來研究單晶體塑性變形時在結晶點陣（結晶格子）內所發生的現象。Н. Е. 烏斯平斯基和 С. Т. 康諾別也夫斯基是用 X 射線分析單晶體塑性變形時所發生的擇尤取向（纖維組織）的先驅者。這些工作奠定了金屬和合金的近代塑性變形理論的基礎。

後來蘇聯學者 Г. С. 日丹諾夫，Г. В. 庫爾鳩默夫，Е. Ф. 巴何密切夫及其他人深入地全面地研究了各種不同金屬和合金的組織，並大大的改善了這些研究的方法。這就使得能更正確地和更科學地、有根據地確定金屬加工過程的技術操作和做好對產品質量的適當檢查。

Г. В. 庫爾鳩默夫，Н. Я. 雪列可夫和 Н. Т. 古德錯夫首先用 X 射線研究了淬火鋼的基本組織馬登體。在以後的研究工作中，Г. В. 庫爾鳩默夫解釋了馬登體的轉變機構，並在此工作的基礎上，創立了鋼中及某些有色合金中馬登體轉變的一般理論。這些研究就做為近代鋼的熱



波里斯·波立索維奇·戈里純

(1862—1916年)

著名的俄國物理學家及地球物理學家。他也是首先在實驗中確定發生X射線的條件並研究其某些性質的科學家之一。

處理理論的基礎。

在斯大林五年計劃的年代裏，我們國內建立了廣泛的X射線實驗室網，在此基礎上產生了廣泛開展用X射線研究金屬及其他材料的巨大的科學中心。

在最近 15 到 20 年內，蘇聯學者在各種不同的X射線分析領域中獲得了巨大的成就。

卓越的蘇聯金屬物理學家 C. T. 康諾別也夫斯基，M. II. 扎哈羅娃教授等人，對有色合金時效的X射線研究工作奠定了近代金屬時效理論的基礎。研究合金內中間相的本性，固溶體的組織以及研究金屬的恢復和再結晶過程等的一系列最重要的工作也是由 C. T. 康諾別也夫斯基完成的。

鋼的回火過程被 Г. В. 庫爾鳩默夫及其同事們詳細研究過，且在此工作的基礎上建立了近代鋼的回火(時效)理論。

Г. И. 阿克塞諾夫首先利用X射線來確定金屬中應力的研究是對X射線學的一大貢獻，這就使得重要零件和各種不同結構的結合機件的檢查得以實現。

Н. В. 阿格也夫及其同事們(Е. Т. 馬加羅夫等)在研究金屬相的組織以及研究建立狀態圖時，廣泛運用各種X射線晶體構造分析技術方面的勞動成果；А. И. 科馬爾在研究有序固溶體的構造及單晶體變形機構方面的工作；Г. С. 日丹諾夫和 В. И. 依弗羅諾娃在研究再結晶和恢復的某些重要理論問題方面的工作；Я. С. 烏曼斯基在研究恢復現象及間隙相的組織問題方面的工作；В. М. 羅文斯基在研究第三種應力及金屬的鑲嵌塊組織等方面的工作，對理論的及實用的金相學均有很大的價值。

在X射線透視範疇內也獲得巨大的成就。在 А. К. 特拉別尼可夫及我國其他科學者的領導下所進行的在此方面的系統研究，使得X射線缺陷檢驗在其他研究金屬組織的方法中也佔一個重要地位，並在生

產中廣泛利用此種方法。

冶金、機械製造及我國國民經濟的其他部門的均衡的發展，提出了一系列的新問題，要想成功地解決這些問題，還要求更廣泛地應用物理的研究方法，尤其是X射線分析方法。

X射線分析方法不僅能探明物質的一般結構形象，且能探明很複雜的技術過程中的某些細節。瞭解了這些過程並對它們進一步全面的研究，使得很多重要技術問題的解決簡單化，而且將促進生產的操作技術和檢查產品質量方法的發展和進一步完善。

第一編 X 射線的物理基礎

第一章 X 射線的獲得及其本性

X-射線是在 1895 年被物理學家樂琴氏所發現。

樂琴氏在研究電子流通過陰極管^①內的稀薄氣體所發生的現象時，偶然發現在一定的條件下從管內出來一種特殊射線，它可以自由地穿過木頭、厚紙板及其他對可見光是不透明的材料。這些射線肉眼是看不到的，但對照像底片起作用並能引起某些物質發光（螢光）。塗蓋着氰鉑化鉬 $[\text{BaPt}(\text{CN})_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}]$ 的遮光板發螢光特別好，藉着它可以觀察射線之出現或消失。

但這樣遮光板發的光還是很弱，故 X 射線的實驗應在暗室中進行。

最近的觀察證明，凡是以高速運動的電子碰到任何障礙物均發生 X 射線。電子由於被急劇的阻止丟失了自己的動能，此動能的一部分就變成 X 射線能。

因此，爲了獲得 X 射線必須有這樣的儀器，它可以：

- a) 用某種方法得到一定量的自由電子。
- b) 迫使這些電子在一定的方向上以最可能大的速度運動。
- B) 在其運動的路徑上設立一個能保證急劇地阻止其運動的障礙物。

上述的見解就是所有近代型的 X 射線管的基礎。這些 X 射線管當中之一用圖解表示在圖 1 上。

① 二電極真空的電學儀器，當其兩電極接以一定的電位差時，即發生所謂陰極射線（有方向之電子流）者，稱爲陰極管。

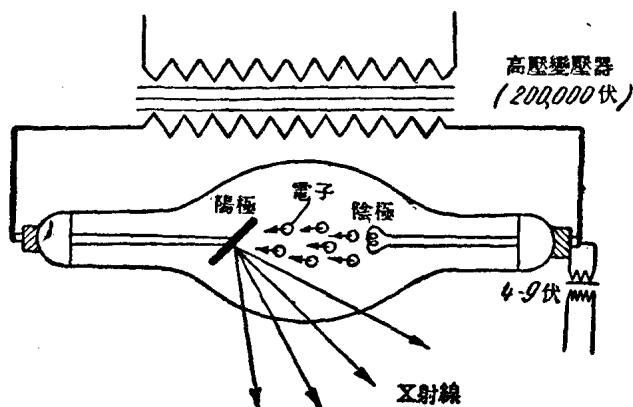


圖 1. 在電子管中獲得X射線之示意圖

此管是一個高度真空的玻璃管，帶有兩個封焊的電極——陽極和陰極，其中熾熱的用鎢絲做成螺線形的陰極就做為電子源^①。陰極線圈以3—4安培電流來加熱，其電壓為4—9伏特。第二個電極——陽極是起阻止電子的障礙物的作用。

管的陽極一般都做成用水冷却的很大的空心銅柱的形狀，在銅柱之一端封焊一個特殊的板(陽極面)，陰極射線的電子就在這個板上被阻止。

為了給電子以必要的速度，並使其在運動中保持一定的方向，在管的電極上加上高電壓(甚至超過200,000伏)，在此高電壓強有力的電場中電子被加速到極大的速度。管的陰極電位較陽極的為負時，這些電子就奔向陽極，它們在陽極上被阻止並發生X射線。

按其本性來說X射線與可見光、鐳的 γ -射線及其他電磁光譜射線相同，也是電磁波的一種。

在表1中表明了X射線在其他電磁波中間的位置。

實際上所採用的波長範疇在從2到 $0.006\text{\AA}$ 之間。

為了定性地鑑別X射線，在實際上常利用“軟”射線和“硬”射線的

① 利用熱電子發射現象來取得電子，即加熱金屬使其放射電子。

表 1

射 線 名 稱	波 長
無線電波·····	30千米—0.3毫米
紅外線·····	0.3毫米—7500Å*
可見光·····	7500Å—4000Å
紫外線·····	4000Å—200Å
X射線·····	10^2 — 10^{-4} Å**
鐳的γ射線·····	0.25Å—0.005Å

* $1\text{Å}=10^{-8}$ 厘米。

** 所指出的X射線波長的範圍應該認為是有條件的。最近幾年來由於超高電壓技術的發展及新型X射線管（叫着β管 бетатрон）的發明可得到一種X射線，其硬度遠遠超過鐳的γ射線。

概念。波長較長的射線稱為“軟”射線，它可能被物質強烈地吸收；“硬”射線是穿透力很强的射線，其波長較短。