

现代冶金丛书

# 金属X射线学

许顺生著

上海科学技术出版社

## 內 容 提 要

本书首先叙述有关 X 射线学及结构晶体学的基本原理, X 射线衍射的各种实验方法及其一般应用;然后分别叙述 X 射线在金属学及金属物理各个方面应用的原理及方法;书末附有较多的常用数据、表格,参考书目以及中、俄、英文名词对照表,便于查阅。

本书可供从事金属学、金属物理及其他有关专业的科学技术工作者参考,也可作为高等学校中这些专业师生教学之用。

现代冶金丛书

## 金 属 X 射 线 学

許 順 生 著

\*

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路450号)

上海市书刊出版业营业许可证出 003 号

新华书店上海发行所发行 各地新华书店经售

上海大东集成联合印刷厂印刷

\*

开本 787×1092 1/25 印张 22 14/25 插页 13 字数 483,000

1962 年 11 月第 1 版 1962 年 11 月第 1 次印刷

印数 1-1,700

统一书号: 15119·1696

定 价: (十二) 2.95 元

## 現代冶金丛书編輯委員會

主任委員：周志宏

常務委員：吳自良 徐祖耀 張文奇 鄒元熾 黃培云 靳樹梁

委員：田庚錫 孫珍寶 孫德和 嚴東生 汪顯 李薰

吳自良 邵象華 陳舜揆 周自定 周行健 周志宏

周宗祥 郁國城 胡為柏 柯俊 徐祖耀 顧翼東

許順生 傅元慶 張文奇 鄒元熾 童光煦 張沛霖

黃培云 靳樹梁 楊尙灼 葛庭燧 錢臨照 魏壽崑

(以姓氏筆劃為序)

## 《現代冶金丛书》序言

近世紀來，冶金科學隨着冶金工業的發展和國防、尖端科學技術的需要，正如其他學科一樣，高速度地向前邁進。過去金屬的冶煉多憑操作經驗，被認為是一種藝術。其後，應用物理化學的原理結合生產情況，通過實驗，掌握了冶金過程的反應規律，因而使冶金技術成為一種實用的科學。另一方面，由於固體物理的發展進入金屬的領域，在充分運用數學和物理的理論與方法以及先進實驗技術的基礎上來研究金屬的基本性質，尋求金屬的成分、結構、組織和性能間關係的規律，並進一步應用其理論與觀點來指導生產實踐，如應用合金理論，晶體缺陷及金屬強度理論，擴散與相變理論等都屬於這一範疇。近年來，由於有關金屬方面科學研究工作的需要，新的實驗工具與技術又得到了發展。如高溫金相，電子顯微鏡（包括金屬薄膜技術），場致發射顯微鏡，放射性同位素，電子、中子衍射，X射綫衍射及散射（包括漫散射，小角度散射及顯微技術），X射綫顯微光譜分析等近代實驗方法，為這方面的研究工作提供了更有利的條件。

在生產實踐過程中，從採選、冶煉到加工、處理，同樣也創造了不少的新技術和新工藝，如在冶煉過程中廣泛應用氧氣與真空技術，不僅提高了金屬的產量，而且顯著地改善了產品的質量。其中尤以氧氣轉爐煉鋼，因為具有一系列優點，有其廣闊的發展前途。連續鑄錠起初用於有色金屬，近年來已推廣用於鑄鋼，其應用範圍日益擴大，對增產節約金屬原料起着一定的作用。利用高溫高壓以強化冶金過程是新的途徑之一。等離子體的火焰溫度常用范

圍从  $4000^{\circ}\text{C}$  左右到  $10,000^{\circ}\text{C}$ , 最高达  $50,000^{\circ}\text{C}$ , 有可能用以进行热分解、气相氯化、气相还原等反应。此外热加工方面的連續、精密及粉末軋制, 爆破成型, 电渣熔焊, 变形奥氏体的淬火以及真空热处理等都在原有的基础上有了不同程度的提高和新的創造。至于目前一些常规的、已应用于大规模生产的冶炼方法, 也在不断地改进中。如試驗直接冶炼鋼、銅、鋁等, 尽管其使用范围有限, 但不失为今后的发展方向。

从上述简单的举例, 可以看出冶金科学技术的丰富内容和一些重大的成就。显然, 这些成就是和世界冶金工作者长时期来的辛勤劳动分不开的。同时, 由于国防、尖端科学技术的日益需要, 对稀有金属、超純金属、高温合金、精密合金以及耐热鋼、超高强度鋼等金属材料提出愈来愈高的要求; 因此可以預見, 今后这方面的成就, 又必然会大大地丰富冶金科学的内容。

解放后, 我国冶金工业和其他工业一样, 在党的正确领导下, 得到迅速的发展, 并已取得一定的成就。但为了进一步促进我国冶金科学技术的发展和繁荣, 培养和扩大冶金工作者的队伍, 使我国冶金科学技术水平能在不太长的时间内接近或赶上国际先进水平, 还有賴于加强学术經驗的交流与傳播。上海科学技术出版社根据上述要求, 邀請国内冶金专家和学者組成“现代冶金丛书”編輯委员会, 从事丛书的计划和編审工作。这一套由我国冶金工作者自己編写的“现代冶金丛书”, 将体现党发展科学文化的百花齐放, 百家爭鳴的方针, 根据我国冶金科学发展的需要, 有系統地反映现代冶金科学技术的成就和我国冶金工作者的研究成果, 以及当前国际与国内冶金科学的学术水平。这是一項有意义而又艰巨的工作, 因此, 十分期望全国冶金工作者予以大力支持和协助, 使本丛书能更加符合广大讀者的需要。我們深信: “现代冶金丛书”

的编写与出版,不仅有利于冶金工作者学术水平的提高,而且也有助于我国整个冶金事业的进步。

周志宏

1962年10月于上海

## 前 言

X 射綫由于波长短、能量高，具有很大的穿透能力，因此在发现后很快就被医学界采用，作为透视人体，检查伤、病的工具。后来又进一步利用能量更高的 X 射綫透视金属，检查鑄、焊等工件中的各种缺陷，对改善金属材料的质量起到很大的作用。

自从发现 X 射綫的波长和許多晶体中的原子間距在同一数量級 ( $10^{-8}$  厘米数量級)，X 射綫束通过晶体时能够发生衍射现象后，X 射綫衍射即被用来进行結晶物质的結構分析，并得到飞速的发展。目前 X 射綫衍射(包括散射)已經成为研究結晶物质及某些非結晶物质微观結構最有效的方法之一，在金属学、金属物理、結晶化学、构造晶体学及其他有关学科的研究及发展方面作出了极其巨大的贡献。

由于高能电子束或 X 射綫束撞击物质时，会发出相应于物质中各种元素的特征 X 射綫，其波长和元素的原子序数有一定的比例关系，因此可以利用 X 射綫譜的分析，确定物质中的化学組成，并且可以用来确定新发现元素的原子序数，找出它在元素周期表上正确的位置。

以上所述 X 射綫透视、X 射綫衍射及 X 射綫譜学是目前应用 X 射綫学中三个主要部分。

本书系根据著者历年来在一些科学研究单位、高等学校及学会所作讲稿，經過汇编、修訂、扩充、整理而成。主要介紹利用 X 射綫进行結晶物质微观結構分析的理论基础及实验方法，尤其着重于在金属研究各个方面的应用。并适当包括 X 射綫应用于金属材料探伤(透视)及化学分析工作的内容。全书着重于理论和实际的紧密联系，对于 X 射綫学中一些較新技术的原理和方法也作了一定的介紹。书末附有参考文献及各种常用的数据、表格，便于

查閱。

本书可供从事金属学及金属物理的科学技术工作者参考，也可以作为高等学校中这些专业的师生教学之用（如学时数较少时，需要进行适当的精简）。对于金属冶炼、加工、物理、化学、化工、矿物结晶学、机械制造等有关专业的科技人员也有一定的参考价值。

本书所用名词主要以中国科学院编译出版委员会名词室重订的《物理学名词》中所列者为准，但也适当采用一些金属学及金属物理工作者惯用的名词。书末附有中、俄、英文名词对照表，可供阅读外文文献资料时参考之用。当外国人名译名在书中初次出现时则加注原文，并在书末附有人名索引，以便对照。

由于篇幅限制，对 X 射线在某些工作中的应用未能在书中作比较详尽的叙述，仅给出参考文献的所在。准备将来有必要时在这些方面用专题的方式进行介绍。

本书手稿承上海科学技术大学教师陈德文等及其他一些同志分别校阅了若干章节，改正了原稿中的错字，同时提出了不少宝贵的意见，业经著者采用于书中；上海科学技术出版社为本书的编辑出版进行了很多的工作，使本书能以较好的形式出现，特此一并致谢。

許 順 生 一九六二年于上海



# 目 录

前 言 .....	1
第一章 X 射綫物理基础 .....	1
1. X 射綫的發現及其本质 .....	1
2. 电磁波 .....	3
3. X 射綫譜 .....	4
4. X 射綫的折射和反射 .....	14
5. X 射綫的吸收 .....	15
6. X 射綫的散射 .....	21
7. X 射綫的物理性质及其經過物质时的作用总结 .....	30
第二章 X 射綫工艺 .....	31
1. X 射綫的发生設備 .....	31
2. X 射綫管 .....	36
3. 使用 X 射綫机时的注意事項 .....	42
4. X 射綫的檢查 .....	45
5. 安全防护 .....	46
第三章 晶体学基础 .....	49
1. 晶体 .....	49
2. 晶体的鍵合 .....	49
3. 点陣及晶胞 .....	50
4. 晶系 .....	52
5. 对称 .....	52
6. 晶类(点群,对称类型) .....	58
7. 布喇非点陣(平移群) .....	61
8. 晶体結構 .....	65
9. 空間群 .....	69
10. 晶面与晶向指数 .....	71
11. 晶体中密堆积的理論基础 .....	74

12. 倒易点陣	78
13. 晶面間距	84
14. 晶帶	87
15. 实际金属晶体	88
<b>第四章 X射綫衍射的基本原理</b>	<b>90</b>
1. X射綫的散射与衍射	90
2. X射綫受到一系列等距离排列质点的散射	90
3. X射綫受一維点陣(原子列)衍射的条件	91
4. X射綫受二維点陣(原子平面,原子网)衍射的条件	94
5. X射綫受三維点陣(晶体点陣)衍射的条件——劳厄方程式	95
6. 布喇格定律	97
7. 經過校正折射后的布喇格定律	100
8. 用倒易点陣方法推导衍射方程式	101
9. 厄瓦耳德图解	103
10. X射綫衍射方法	104
<b>第五章 X射綫衍射綫束的强度</b>	<b>106</b>
1. 衍射綫的绝对强度和相对强度	106
2. 粉末法衍射綫条的累积强度和相对强度	106
3. 結構因数	108
4. 結構因数計算	111
5. 多重性因数	116
6. 角因数	117
7. 温度因数	119
8. 吸收因数	123
9. 粉末法衍射綫条相对强度計算举例	124
10. 速度因数	126
11. 周轉晶体、回摆晶体及劳厄法衍射斑点的相对强度	125
12. 初級消光和次級消光	127
13. 衍射綫条强度的測量方法	128
<b>第六章 X射綫衍射方法(一)——劳厄法</b>	<b>131</b>
1. 实验方法的一般介紹	131
2. 实验设备及手續	132

3. 劳厄衍射花样 .....	135
4. 劳厄衍射斑点的位置及形状 .....	139
5. 劳厄法衍射原理的厄瓦耳德图解 .....	141
6. 劳厄法的应用 .....	143
<b>第七章 X 射线衍射方法(二)——周轉晶体法</b> .....	<b>145</b>
1. 实验方法的一般介绍 .....	145
2. 周轉晶体法的衍射花样 .....	146
3. 周轉晶体法衍射原理的厄瓦耳德图解 .....	148
4. 周轉晶体法衍射花样的指数化 .....	150
5. 运动底片法的简单介绍 .....	154
<b>第八章 X 射线衍射方法(三)——粉末法(照相法)</b> .....	<b>155</b>
1. 实验方法的一般介绍 .....	155
2. 德拜-謝乐法(德拜法) .....	156
3. 聚焦法 .....	166
4. 針孔法 .....	168
5. 照相机的分辨本领 .....	169
6. 晶体单色器 .....	171
7. 輻射的选择 .....	175
8. 衍射花样上背景的来源及可能的消除方法 .....	176
9. 粉末法衍射原理的厄瓦耳德图解 .....	176
<b>第九章 X 射线衍射方法(四)——衍射仪法</b> .....	<b>179</b>
1. 实验方法的一般介绍 .....	179
2. 衍射几何及衍射仪的构造 .....	179
3. 衍射綫束的强度 .....	181
4. 盖革-弥勒計数器 .....	182
5. 正比計数器及閃爍計数器 .....	184
6. 衍射仪的电路設計 .....	186
7. 定标器 .....	187
8. 計数时率計 .....	189
9. 实验手續 .....	190
10. 衍射仪法和照相法的比較 .....	192
<b>第十章 X 射线的小角度散射</b> .....	<b>194</b>

1. X 射线小角度散射原理 .....	194
2. 实验布置及手续 .....	202
3. X 射线小角度散射方法的应用 .....	205
<b>第十一章 晶体取向的测定 .....</b>	<b>208</b>
1. 晶体的球面、极射赤面及心射切面投影 .....	208
2. 用背射劳厄法测定晶体取向 .....	225
3. 用穿透劳厄法测定晶体取向 .....	233
4. 用衍射仪法测定晶体取向 .....	234
5. 安置单晶体于一定取向的方法 .....	237
<b>第十二章 晶体结构的测定 .....</b>	<b>240</b>
1. 测定晶体结构的方法和步骤 .....	240
2. 测定晶胞的形状及大小 .....	241
3. 晶胞中原子数目的测定 .....	241
4. 立方晶体粉末法衍射花样的指数化 .....	242
5. 非立方晶体衍射花样的指数化 .....	244
6. 测定晶体的点阵类型及对称情况 .....	249
7. 测定晶胞中的原子位置 .....	252
8. 晶体结构测定举例 .....	252
<b>第十三章 点阵常数的精确测定 .....</b>	<b>258</b>
1. 基本原理及一般介绍 .....	258
2. 各种实验方法中误差的来源 .....	262
3. 用图解法消除误差 .....	266
4. 用精密实验法消除误差 .....	267
5. 用最小二乘方法(柯亨法)消除误差 .....	270
6. 其他消除误差的方法 .....	274
<b>第十四章 利用 X 射线进行化学分析的方法 .....</b>	<b>275</b>
1. 多晶体样品中物相的鉴定 .....	275
2. 多相物质中各相的定量分析 .....	279
3. X 射线的发射光谱分析 .....	284
4. 利用 X 射线吸收的化学分析方法 .....	291
5. 金属扩散偶的 X 射线分析 .....	294
<b>第十五章 多晶体材料中晶粒度的测定 .....</b>	<b>298</b>

1. 一般介紹 .....	298
2. 晶粒度为 $10^{-3}$ ~ $10^{-2}$ 厘米(10~100 微米) 时的測定方法 .....	299
3. 晶粒度在 $10^{-4}$ 厘米数量級及更細小时的測定方法(衍射綫条寬化及其他方法) .....	302
第十六章 固溶体合金的 X 射綫分析(一) .....	310
合金相图中固溶极限的測定 .....	310
1. 固溶体的类型 .....	310
2. 合金系統的相平衡图 .....	313
3. 样品准备 .....	316
4. 二元合金系統中溶质元素固溶极限的測定方法 .....	317
5. 三元合金相图中固溶极限的測定 .....	320
第十七章 固溶体合金的 X 射綫分析(二) .....	324
固溶体点陣的有序化 .....	324
1. 长程有序参数 .....	324
2. 以面心立方結構为基的超点陣 .....	325
3. 以体心立方結構为基的超点陣 .....	325
4. 以六角密堆結構为基的超点陣 .....	336
5. 有序化轉变过程 .....	336
第十八章 固溶体合金的 X 射綫分析(三) .....	340
固溶体的結構(X 射綫漫散射方法) .....	340
1. 短程有序和原子类聚 .....	340
2. 劳厄单調漫散射 .....	342
3. 实际替代式固溶体的結構 .....	342
4. 其他漫散射强度 .....	346
5. 实验手續 .....	347
6. 实验結果及分析举例 .....	349
第十九章 金属材料中应力的量度 .....	357
1. 一般介紹 .....	357
2. X 射綫方法和其他方法的比較 .....	358
3. 宏观区域单軸綫彈性应力的測量 .....	359
4. 宏观区域双軸綫彈性应力的測量 .....	361
第二十章 金属范性形变的 X 射綫研究(一) .....	368

金属晶体的冷加工、回复及再结晶 .....	368
1. 金属单晶体的滑移及晶面弯曲 .....	368
2. 孪生 .....	374
3. 利用极射赤面投影方法测定滑移面或孪生面的指数 .....	379
4. 多晶体金属材料的冷加工及第二种应力的测量 .....	380
5. 回复及再结晶 .....	384
<b>第二十一章 金属范性形变的 X 射线研究(二) .....</b>	<b>386</b>
金属材料中的择优取向 .....	386
1. 多晶体材料中的择优取向(织构)和极图 .....	386
2. 冷拉金属线材(或挤压棒材)织构的测定——X 射线照相法 .....	388
3. 冷轧金属板材织构的测定——X 射线照相法 .....	394
4. 利用衍射仪方法测定板材中的织构 .....	399
5. 再结晶织构(退火织构) .....	403
<b>第二十二章 不完整晶体的 X 射线观测 .....</b>	<b>407</b>
1. 完整晶体和不完整晶体的倒易空间构造 .....	407
2. 一维及二维晶体点阵的 X 射线衍射效应 .....	408
3. 晶体点阵中的畸变及特征温度的测定 .....	411
4. 晶体中的位错 .....	414
5. 点阵畸变应力(第三种应力)的测量 .....	417
6. X 射线衍射显微镜观察 .....	420
7. 单个位错线的 X 射线观测 .....	422
<b>第二十三章 合金热处理及相转变的 X 射线分析(一) .....</b>	<b>427</b>
钢的热处理及相转变 .....	427
1. 钢中主要相的结构 .....	427
2. 钢中马氏体转变机理的 X 射线研究 .....	430
3. 淬火温度和速度对钢组织结构的影响 .....	438
4. 淬火钢中残余奥氏体量的测定 .....	439
5. 淬火钢回火的 X 射线分析 .....	442
<b>第二十四章 合金热处理及相转变的 X 射线分析(二) .....</b>	<b>447</b>
铝合金的时效硬化 .....	447
1. 一般介绍 .....	447
2. 铝-铜合金时效过程的 X 射线分析 .....	449

3. 鋁-銀合金时效过程的 X 射綫分析 .....	456
4. 鋁-鎂-硅及鋁-鎂-鎘系統合金时效过程的 X 射綫分析 .....	465
5. 时效过程中合金的复相分解 .....	468
<b>第二十五章 金属材料的 X 射綫透視(探伤)及显微透視 .....</b>	<b>470</b>
1. 透視原理及其在金属材料探伤中的应用 .....	470
2. 透視照相的质量及增感屏的使用 .....	472
3. 操作規程及檢驗方法 .....	475
4. $\gamma$ -射綫透視 .....	478
5. X 射綫显微透視 .....	479
<b>第二十六章 电子衍射及中子衍射 .....</b>	<b>482</b>
1. 电子波 .....	482
2. 电子衍射設備、試样及实验手續 .....	483
3. 单晶体的电子衍射花样 .....	485
4. 电子衍射的应用 .....	487
5. 中子衍射 .....	487
<b>附 录 .....</b>	<b>490</b>
一、物理常数及若干常用数据 .....	490
1. 物理常数 .....	490
2. 常用数据 .....	490
二、希腊字母表 .....	491
三、元素的物理性质 .....	492
四、标識发射譜綫及吸收限波长 .....	496
五、K 系及 L 系标識 X 射綫譜的激发电势 .....	498
六、元素的质量吸收系数 .....	499
七、原子散射因数 .....	502
1. 輕原子及离子的散射因数 .....	502
2. 重原子的散射因数 .....	504
八、角因数 .....	508
1. 偏振因数 $\left(\frac{1+\cos^2 2\theta}{2}\right)$ , 为 $\sin \theta$ 的函数 .....	508
2. 洛倫茲一偏振因数, 为 $\sin \theta$ 的函数 .....	509
3. 洛倫茲一偏振因数, 为 $\theta$ 的函数 .....	510
九、德拜-瓦洛温度因数 .....	512

十、吸收因数	513
1. 圆柱状粉末试样, 当 $\mu r < 5$ 时的 $100 A(\theta)$	513
2. 圆柱状粉末试样, 当 $\mu r > 5$ 时 $A(\theta)$ 的相对值	515
十一、立方晶系的指数及二次式	516
十二、六角晶体的 $s(h^2 + hk + k^2)$ 及 $\frac{4}{3}s$ 的数值	518
十三、 $\sin^2 \theta$ 的数值	519
十四、 $\frac{\sin \theta}{\lambda} (\text{\AA}^{-1})$ 的数值	522
十五、 $\frac{1}{2} \left( \frac{\cos^2 \theta}{\sin \theta} + \frac{\cos^2 \theta}{\theta} \right)$ 的数值	524
十六、本恩图表的原理及绘制方法	527
十七、若干常见化合物的晶体结构	532
1. 无机化合物及矿物	532
2. 金属间化合物	534
参考文献	535
一、X 射线学参考书籍	535
二、期刊及其他文献	540
人名索引	549
中、俄、英文名词对照表及索引	552



# 第一章 X射綫物理基础

## 1. X射綫的发现及其本质

1895年德国物理学家倫琴(Röntgen, W. O.)<sup>[81]</sup>因为研究阴极射綫而发现了一种新的射綫,它不能用肉眼观察,但却可以使鉑氰化鋇的荧光屏发光。继续深入研究后,发现这种射綫以直綫傳播,经过电場时不发生偏轉;具有很高的穿透能力,可以穿过黑紙以及其他对于可見光是不透明的物质,而仍旧能使荧光屏发出亮光,或者使照相底片感光;当穿过物质时它可以被偏振化,并被物质吸收而使强度衰减;它能够使空气或其他气体电离,并能杀伤生物細胞。由于刚发现时对这种新射綫的本质还不了解,即称之为X射綫(在代数学上常用X代表未知数),后来为了紀念它的发现者,人們也叫它为倫琴射綫。

当X射綫发现后,第二年即被医学界采用作为检查人体伤病的工具,以后还被用来檢驗金属或其他物件内部的缺陷;但在X射綫衍射现象发现后,它的应用得到了更大的发展。

劳厄(Laue, M. von)等<sup>[82]</sup>在1912年証实了X射綫可以发生衍射作用,他們根据前人的工作,知道X射綫中包含有某种波,其波长很短,約在 $10^{-9}$ 厘米数量級,同时根据过去晶体学的研究知道晶体具有規則的内部排列,其相邻原子間的距离也在 $10^{-8}$ 厘米的数量級,因此有可能利用晶体作为产生X射綫衍射的光栅,使入射的X射綫经过某种晶体后发生衍射。实验工作証明了这点,因而也証明了X射綫在本质上是属于电磁波的一种,它的波长很短,約在 $10^{-8}$ 厘米左右。利用X射綫在结构已經知道的晶体中发生衍射,可以用来測定各种X射綫的波长;反过来,用已知波长的X射綫又可以作为研究晶体结构,以及与晶体结构有关的各种现象的有力工具。