

材料科学与工程著作系列
HEP Series in Materials Science and Engineering

HEP
MSE

材料分析方法

Analytical Methods
for Materials

董建新

 高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

材料
HEP Series in Materials Scier

材料分析方法

Analytical Methods for Materials

董建新

CALIAO FENXI FANGFA



高等教育出版社·北京
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

图书在版编目(CIP)数据

材料分析方法 / 董建新编著. — 北京 : 高等教育出版社, 2014. 2

(材料科学与工程著作系列)

ISBN 978-7-04-039048-3

I. ①材… II. ①董… III. ①工程材料—分析方法
IV. ①TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 303157 号

策划编辑 刘剑波 责任编辑 刘剑波 封面设计 姜磊 版式设计 杜微言
插图绘制 尹莉 责任校对 张小镝 责任印制 韩刚

出版发行	高等教育出版社	咨询电话	400-810-0598
社 址	北京市西城区德外大街 4 号	网 址	http://www.hep.edu.cn
邮政编码	100120		http://www.hep.com.cn
印 刷	涿州市星河印刷有限公司	网上订购	http://www.landracom.com
开 本	787mm × 1092mm 1/16		http://www.landracom.com.cn
印 张	33.5	版 次	2014 年 2 月第 1 版
字 数	610 千字	印 次	2014 年 2 月第 1 次印刷
购书热线	010-58581118	定 价	59.00 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换

版权所有 侵权必究

物 料 号 39048-00

前 言

“材料分析方法”是材料学科必修的公共技术基础课之一。在学习掌握了“材料科学与工程基础”的相关知识后，本课程侧重于从材料的微观角度来揭示和理解材料的组织性能演变规律。通过将课堂授课和实验教学相结合，使学生掌握材料分析的基本方法，包括光学金相、扫描电子显微镜、透射电子显微镜、X射线和电子衍射结构分析等；通过解析相关的基本原理，使学生了解分析设备的操作过程及解决实际问题的具体应用。

本书在内容安排上由浅入深，从利于理解和掌握的形貌分析方法着手，用材料研究过程中的具体案例分析作为加深理解知识要点的手段，遵循从可“看到”的形貌分析到抽象的结构分析的授课思路。教材首先以材料分析案例作为引入，以建立在电子显微学基础上的扫描电子显微镜和透射电子显微镜为分析方法基础，突出电子显微分析的试样制备过程，结合对具体案例的分析和总结，便于学生加深理解以形貌观察分析为主的课程内容；进而以X射线衍射分析和电子衍射分析为基础，对材料结构分析的原理、方法和应用进行系统阐述，再以综合案例分析对课程内容进行归纳总结。为了使读者能对其他材料研究方法有初步的了解，本书在最后对材料计算分析方法进行了简述，并提供了俄歇电子能谱分析、扫描隧道显微分析等其他显微分析方法，作为后续课程和研究的基础。

为此，全书共分14章，以第六章“材料基本分析方法案例”和第十二章“材料综合分析方法案例”为界面，分为三大部分。第一部分主要阐述基于形貌分析的方法，以第一章的案例引入阐明材料分析方法的学习目的和意义；第二章则是复习已经在“材料科学与工程基础”课程中学习过的金相技术，作为后续进一步分析方法的对照和基础；在对第三章“电子显微分析基础”了解和掌握的基础上，以第四章的“扫描电子显微分析”和第五章的“透射电子显微分析”阐述基于形貌分析的两种最基本的电子显微分析方法，突出分析试样制备技术和应用，为后续章节的结构分析提供基础分析手段，并以这种由“表”及“里”的课程安排方便读者循序渐进地理解课程内容。第六章的案例可对前五章内容巩固理解并起到学以致用作用。随后第七章至第十一章讲述结构分析，即X射线分析和电子衍射分析。第七章到第九章为X射线分析，分别介绍X射线的性质和表征、X射线的相关分析方法，以及利用X射线对材料

前言

结构进行应用分析；第十章和第十一章主要阐述电子衍射基本原理，重点讲述电子衍射谱的标定及应用。在以上形貌分析和结构分析的基础上，以第十二章综合案例分析作为总结。第十三章“材料计算分析方法”和第十四章“其他显微分析方法”作为本课程补充拓展的内容。

本书课堂授课学时建议为 50 学时，实验学时最少应为 12 学时，可分成 3 个基本实验进行，即扫描电子显微镜观察、透射电子显微镜观察及 X 射线衍射分析。若条件允许，建议增加用于组织结构分析的试样制备环节的实验及 X 射线残余应力分析等实验。

本书除了应用作者的研究结果作为图例外，还参考和引用了其他优秀教材和研究成果，以文献的方式予以标注，在此谨致谢忱。在引用的过程中若文献的标注欠准确，请指正并请谅解。也恳请读者对本书内容的疏漏和不当之处批评指正。

董建新
2014 年 2 月

郑重声明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》，其为人将承担相应的民事责任和行政责任；构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。为了维护市场秩序，保护读者的合法权益，避免读者误用盗版书造成不良后果，我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人进行严厉打击。社会各界人士如发现上述侵权行为，希望及时举报，本社将奖励举报有功人员。

反盗版举报电话 (010) 58581897 58582371 58581879

反盗版举报传真 (010) 82086060

反盗版举报邮箱 dd@hep.com.cn

通信地址 北京市西城区德外大街4号 高等教育出版社法务部

邮政编码 100120

目 录

第一章 材料分析方法及案例	1
1.1 材料科学研究的基本方法	1
1.1.1 归纳与演绎法	1
1.1.2 分析与综合法	2
1.1.3 类比与移植法	3
1.1.4 数学与模型法	3
1.1.5 系统与优化法	5
1.1.6 假说与理论法	5
1.1.7 原型启发与仿生法	6
1.2 材料的组织结构及测定	6
1.2.1 材料的组织结构	6
1.2.2 材料结构的测定与表征	7
1.3 案例及材料分析引入	9
本章知识点	14
第二章 光学显微组织分析	15
2.1 金相显微镜的原理及使用	15
2.1.1 金相显微镜的原理	15
2.1.2 物镜	16
2.1.3 目镜	18
2.1.4 照明方式	19
2.1.5 调整和维护	19
2.2 金相试样的制备方法	20
2.2.1 金相试样的截取及镶嵌	20
2.2.2 金相试样的磨光	21
2.2.3 金相试样的抛光	23
2.2.4 金相试样的显微组织显露方法	24
2.2.5 试样制备自动化	27
2.3 金相组织显示和记录	28
本章知识点	29

第三章 电子显微分析基础	31
3.1 电子波与电磁透镜	32
3.1.1 光学显微镜的分辨率极限	32
3.1.2 电子波的波长	32
3.1.3 电磁透镜	33
3.1.4 电磁透镜的像差和分辨率	35
3.1.5 电磁透镜的景深和焦距	39
3.2 电子与物质的交互作用	41
3.2.1 散射	41
3.2.2 高能电子与试样物质交互作用产生的电子信息	43
本章知识点	52
思考题	52
第四章 扫描电子显微分析	53
4.1 扫描电子显微镜的工作原理及构造	54
4.1.1 工作原理	54
4.1.2 构造与主要性能	55
4.2 扫描电子显微镜的试样制备和衬度原理	60
4.2.1 试样制备	60
4.2.2 衬度原理	64
4.3 扫描电子显微技术的应用	70
4.3.1 断口分析	70
4.3.2 相的析出和分布特征分析	76
4.3.3 元素分布行为的分析	77
4.3.4 结构分析	78
本章知识点	84
思考题	85
第五章 透射电子显微分析	87
5.1 透射电子显微镜的结构与成像原理	88
5.1.1 照明系统	88
5.1.2 成像系统	92
5.1.3 观察记录系统	94
5.1.4 主要部件的结构与工作原理	94
5.1.5 透射电子显微镜分辨率和放大倍数的测定	99
5.2 表面复型技术	100
5.2.1 质厚衬度原理	101

5.2.2 复型制备技术	104
5.2.3 粉末试样的制备	108
5.3 薄膜制备技术	109
5.3.1 金属块体制成薄膜试样	110
5.3.2 薄膜平面试样的制备	118
5.3.3 薄膜截面试样的制备	119
5.4 透射电子显微技术的应用	121
本章知识点	125
思考题	125
第六章 材料基本分析方法案例	127
6.1 船用液压缸断裂原因分析	127
6.2 增压器涡轮叶轮断裂原因分析	131
6.3 苯胺装置制氢转化炉管外接法兰开裂原因分析	134
6.4 烟气轮机动叶片断裂原因分析	139
本章知识点	142
第七章 X射线分析基础	143
7.1 X射线物理学基础	143
7.1.1 X射线的产生及其性质	143
7.1.2 X射线衍射学基础	156
7.2 X射线衍射的几何原理	171
7.2.1 晶体点阵对X射线衍射及劳厄方程	171
7.2.2 布拉格方程	175
7.2.3 埃瓦尔德图解	179
7.2.4 衍射方向理论小结	181
7.3 X射线衍射线束的强度	182
7.3.1 一个电子的散射强度	182
7.3.2 原子散射强度	183
7.3.3 单胞对X射线的散射	185
7.3.4 小晶体的衍射积分强度	190
7.3.5 多晶体的衍射积分强度	191
7.3.6 影响衍射强度的其他因素	193
本章知识点	196
思考题	196
第八章 X射线分析方法	197
8.1 多晶体衍射方法	197

8.1.1	粉末法成像原理	197
8.1.2	德拜相机与实验技术	199
8.1.3	衍射花样指数标定	204
8.1.4	聚焦法简介	208
8.2	单晶体衍射方法	210
8.2.1	劳厄法	210
8.2.2	劳厄法成像原理和对衍射斑点分布规律的解释	211
8.2.3	劳厄衍射花样指数化	213
8.2.4	晶体取向的测定	220
8.3	X射线衍射仪法	222
8.3.1	测角仪	223
8.3.2	测角仪的光学布置	225
8.3.3	探测器	226
8.3.4	衍射仪的运行方式	228
8.3.5	实验参数的选择	229
8.4	电子探针显微分析	232
8.4.1	电子探针的结构与工作原理	232
8.4.2	电子探针的分析方法及应用	239
8.5	非晶态物质的衍射分析	241
8.5.1	非晶态	241
8.5.2	非晶态物质结构的主要特征	243
8.5.3	非晶态结构的径向分布函数	244
8.6	X射线小角度散射方法	254
8.6.1	X射线小角度散射原理	254
8.6.2	X射线小角度散射实验	260
8.6.3	X射线小角度散射方法的应用	262
	本章知识点	264
	思考题	265
第九章	X射线应用分析	267
9.1	X射线物相分析	267
9.1.1	物相的定性分析	268
9.1.2	物相的定量分析	274
9.2	点阵常数精确测定	282
9.2.1	点阵常数精确测定的原理	282
9.2.2	德拜-谢勒法中系统误差的来源	283

9.2.3	衍射仪法的主要误差来源	286
9.2.4	德拜-谢勒法的误差校正方法	287
9.2.5	点阵常数测定举例	292
9.3	宏观应力测定	293
9.3.1	X射线应力测定的基本原理	294
9.3.2	实验方法	297
9.3.3	实验精度的保证及测试原理的适用条件	300
9.4	织构测定	305
9.4.1	织构的分类及表示方法	306
9.4.2	冷拉金属丝织构的测定	311
9.4.3	板织构的测定	319
9.5	晶块尺寸和点阵畸变测定	327
9.5.1	衍射线的宽化	328
9.5.2	实测衍射峰与物理宽化的关系	331
9.5.3	应用近似函数法的测量技术	334
9.5.4	仪器宽化效应的分离	336
9.5.5	点阵畸变和亚晶块细化两种效应的分离	337
	本章知识点	340
	思考题	340
第十章	电子衍射分析	343
10.1	电子衍射基本原理	343
10.1.1	电子衍射技术发展概况	343
10.1.2	电子衍射和X射线衍射的比较	344
10.1.3	晶体对电子的散射	346
10.2	透射电子显微镜中的衍射	356
10.2.1	有效相机常数	356
10.2.2	选区电子衍射	357
10.2.3	透射电子显微镜中的衍射	358
10.2.4	选区电子衍射的原理及操作	360
10.3	常见的几种电子衍射谱	361
10.3.1	单晶电子衍射谱	361
10.3.2	多晶电子衍射谱	361
10.3.3	织构试样的电子衍射谱	362
10.3.4	多次衍射谱	362
10.3.5	高级劳厄带	363

10.3.6	菊池线	365
10.3.7	超点阵斑点	365
10.3.8	孪晶斑点	366
10.4	多晶电子衍射花样及其应用	369
10.4.1	多晶电子衍射花样的产生及几何特征	369
10.4.2	多晶电子衍射花样的应用	371
10.5	单晶电子衍射花样及其应用	374
10.5.1	单晶电子衍射花样的几何特征和强度	374
10.5.2	单晶电子衍射花样的标定方法	377
10.5.3	单晶电子衍射花样的基本应用	387
10.6	低能电子衍射	392
10.6.1	单晶表面原子排列与二维点阵	392
10.6.2	二维点阵的倒易点阵	393
10.6.3	低能电子衍射原理	396
10.6.4	低能电子衍射仪	397
10.6.5	低能电子衍射分析与应用	398
	本章知识点	400
	思考题	400
第十一章	电子衍射衬度成像	403
11.1	电子像衬度的分类及其成像方法	403
11.1.1	质厚衬度成像原理	404
11.1.2	衍射衬度成像原理	405
11.1.3	相位衬度成像原理	408
11.1.4	消光距离	409
11.2	衍衬运动学	411
11.2.1	基本假设	411
11.2.2	理想晶体的衍射强度	412
11.2.3	理想晶体衍衬运动学基本方程的应用	414
11.2.4	非理想晶体的衍射衬度	418
11.3	衍衬动力学简介	420
11.3.1	运动学理论的不足之处及适用范围	420
11.3.2	完整晶体的动力学方程	421
11.3.3	不完整晶体的动力学方程	423
11.4	晶体缺陷分析	423
11.4.1	层错	424

11.4.2	位错	427
11.4.3	第二相粒子	430
	本章知识点	433
	思考题	433
第十二章	材料综合分析方法案例	435
12.1	烟气轮机涡轮盘开裂原因分析	435
12.2	IC10 定向凝固高温合金组织特征及 B 的影响	441
12.3	晶界块状或颗粒状相的本质特征	448
12.4	K418 合金增压器涡轮叶片热裂分析	450
	本章知识点	455
第十三章	材料计算分析方法	457
13.1	计算机在材料科学中的应用	458
13.1.1	计算机模拟技术用于材料行为工艺研究	458
13.1.2	计算机技术用于材料数据库和知识库	459
13.1.3	计算机技术用于材料设计	460
13.1.4	计算机技术用于材料加工控制	461
13.1.5	计算机技术用于材料性能表征与检测	461
13.1.6	计算机技术用于材料数据和图像处理	462
13.1.7	计算机网络技术用于材料科学研究	462
13.2	材料科学研究中的数学模型及分析方法	462
13.2.1	数学模型基础及建模方法	463
13.2.2	有限差分法	465
13.2.3	有限元法	467
13.2.4	蒙特卡罗法	472
13.2.5	分子动力学法	472
13.2.6	人工神经网络法	476
13.3	材料计算方法应用实例	477
13.3.1	GH4169 高温合金的热力学平衡相模拟计算	477
13.3.2	扩散连接过程元素互扩散规律的动力学模拟计算	479
13.3.3	夹杂物及附近基体应力应变场的有限元模拟计算	483
13.3.4	GH738 涡轮盘锻造成形过程组织模拟计算	486
	本章知识点	488
第十四章	其他显微分析方法	489
14.1	离子探针显微分析	489
14.2	俄歇电子能谱分析	493

目录

14.2.1	俄歇跃迁及其概率	493
14.2.2	俄歇电子能谱的检测	495
14.2.3	定量分析	498
14.2.4	俄歇电子能谱仪的应用	498
14.3	场离子显微镜与原子探针	501
14.3.1	场离子显微镜的结构	501
14.3.2	场致电离和原子成像	503
14.3.3	图像的解释	504
14.3.4	场致蒸发和剥层分析	505
14.3.5	原子探针	506
14.3.6	场离子显微镜的应用	506
14.4	扫描隧道显微镜与原子力显微镜	509
14.4.1	扫描隧道显微镜的分辨率	509
14.4.2	扫描隧道显微镜的工作原理	510
14.4.3	原子力显微镜	512
14.5	X射线光电子能谱分析	515
14.5.1	X射线光电子能谱的测量原理	515
14.5.2	定性分析	518
	本章知识点	519
	参考文献	521

第一章

材料分析方法及案例

材料在人类文明进程中所起的作用是巨大的，现代高技术的发展依赖于新材料技术的发展。材料学科已经成为自然科学中一个重要的基础学科，自然科学的各种研究方法在材料科学的发展中发挥了很大的作用，而且在不断地产生新的研究思路和研究方法。

材料科学从经验科学逐步走向理性科学，很重要的发展方向是材料的设计与模拟。目前，人们在模拟设计方面取得了较大的成功，在材料的计算设计方面也已经迈出了坚实的步伐。本章结合材料科学与工程学科特点，归纳介绍有关的科学研究方法。简单阐述材料组织结构与测定的基础知识，并以材料研发过程中发生的实际案例为引入，使读者建立对材料分析方法的感性认识，以便逐渐进入本课程的系统学习。

1.1 材料科学研究的基本方法

1.1.1 归纳与演绎法^[1]

归纳法是前提与结论之间有或然性联系的推理，归纳是从特殊到一般；演绎法是前提与结论之间有必然性联系的推理，演绎是从一般到特殊，其大前提多是一般性原理或公理。

归纳法与其他逻辑方法主要的区别，不仅在于它的推理方向是从个别到一般的过程，而且还在于它的结论是未经证实的，具有或然性。这是由归纳法的客观基础所决定的。因为任何个别事实中都包含着某种一般性，所以归纳结果有一定的可靠依据。但是又因为任何个别都不能完全地包括在一般之中，所以归纳的结论就不能不带有比较大的或然性。

演绎法是从已知的一般原理、定理、法则、公理或科学概念出发，推论出某些事物或现象具有某种属性或规律的新结论的一种科学研究方法。演绎法是从一般原理推理出个别结论的方法。其主要形式是三段论，即由大前提、小前提和结论组成。大前提是已知的一般原理，小前提是已知的个别事实与大前提中的全体事实的关系，结论是由大、小前提中通过逻辑推理关系获得的关于个别事实的认识。对于演绎推理来说，前提的真实性和形式的正确性是相对独立的，为了必然地得到真实的结论，一个演绎推理必须是前提真实而且形式正确。

1.1.2 分析与综合法

分析法就是把研究对象分解成几个组成部分，然后分别加以研究，从而认识事物的基础或本质的一种科学研究方法。分析法是以客观事物的整体与部分的关系为客观基础的。事物的各种属性、部分或关系从不同方面表现了事物的整体性。客观事物中的整体和部分之间的关系使分析法成为可能和必要。

分析法在思维方式上的特点，在于它从事物的整体深入到它的各个组成部分，通过深入地认识事物的各个组成部分来认识事物的内在本质或整体规律。基本上有3个环节：

- 1) 把整体加以“解剖”，从整体中按照一定特性分离出各个部分。
- 2) 深入分析各个部分的特殊本质，这是分析法的重要环节。
- 3) 进一步分析各个部分的相互联系、相互作用的情况，了解它们各自在整体中的地位、作用，了解各个部分之间相互作用的规律。

由于分析法具有以上特点，所以它在科学认识发展中具有重要的意义。它使科学认识从一个层次发展到更加深入的层次，它是使现象的认识进入本质认识的重要条件。分析法几乎贯穿于科学研究的全过程，并且渗透到所有的研究方法中。

分析法也有局限性。对事物进行必要的分割，孤立研究各部分，虽然能将人们的认识引向深入，但是也可能将人们的认识限制在片面、狭窄的领域里。所以，要认识事物，不仅要认识事物的部分，更要认识事物的整体，这就要运用综合的方法。

综合法与分析法相比，两者认识过程的方向是完全相反的。所谓综合法，

就是把研究对象的各个部分联系起来加以研究，从而在整体上把握事物的本质和规律的一种科学研究方法。

综合法在思维方式上的特点是，它把事物的各个部分联结为整体时，力求全面掌握事物各部分、各方面的特点以及它们之间的内在联系，然后加以概括和上升，从事物各部分及其属性、关系的真实联结和本来面目，复现事物的整体，将其综合为多样性的统一体。

1.1.3 类比与移植法

类比法是指通过对两个或两类事物或现象进行比较，根据其相似点或相同点，推论出它们的其他属性或规律也可能有相似点或相同点的结论。这是以比较为基础，既包含从特殊到特殊，又包含从一般到一般的逻辑思维方法。实际上，各学科彼此之间是有内在联系的，为了解决某个科学领域的问题，应该借助于其他有关的科学知识。移植法是指将某学科的原理、方法或技术等应用于研究和解决同一学科内的其他分支学科或其他学科和技术领域的原理、方法或技术问题。它是通过横向、纵向联系和类比等方法进行的，所以移植法和类比法、联想法有密切的联系和相似之处。

在材料科学中，移植法的应用非常普遍。如金属中的相变、韧化、磁畴等原理都在陶瓷材料中得到了移植应用；金属材料压力加工技术应用在高分子材料中，如塑料注射成形、压延成形等；金属材料的断裂力学理论在陶瓷材料、高分子材料和复合材料中都得到了很好的移植应用。

1.1.4 数学与模型法

数学方法是揭示研究对象的本质特征和变化规律的一种方法，是解决科学技术问题常用的也是最重要的方法。具体说来，数学方法是运用数学所提供的概念、理论和方法对研究对象进行数量、结构等方面的定量分析、描述和推导及计算，以便从量的概念上来对研究的问题作出分析、判断，认识事物变化的本质规律。

原则上，一切科学技术都可以用数学来解决有关问题。力学和物理是最早数学化的学科。随着量子力学的理论与方法引入化学领域，数学方法在化学中的作用越来越明显，古老的经验学科——化学也正在逐步转变为理论严密的系统的精确学科。现代生物学中，也已经大量运用数学方法来研究生理现象、神经活动、生态系统及遗传规律等重要的问题，并且产生了数学生物学和生物数学这样的交叉学科。材料科学也是如此，现在兴起了计算材料学及计算设计材料的热潮，材料学科也正在逐步由经验学科向精确学科发展。

在现代科学技术中所应用到的数学越来越广泛，而且许多极其抽象的数学