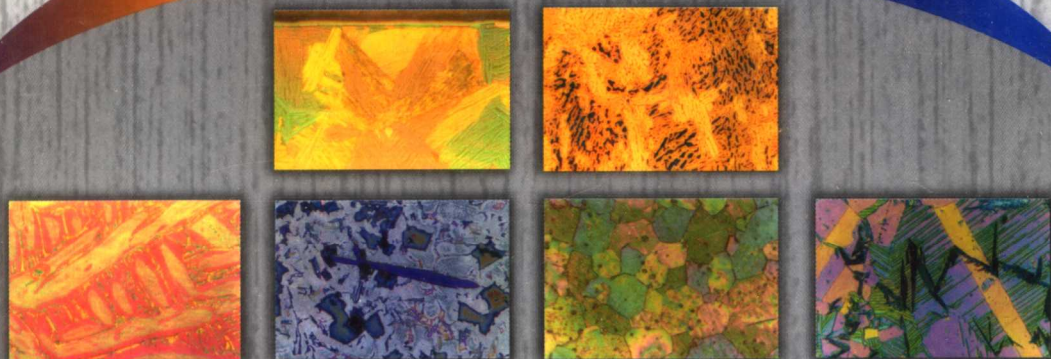


“十一五”国家重点图书

金属材料 理化测试全书

屠海令 干 勇 主编



化学工业出版社

“十一五”国家重点图书

金属材料理化测试全书

屠海令 干 勇 主编



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书阐述了金属材料的化学成分、宏观和微观组织结构、金属材料的缺陷、力学及其他各种物理性能的分析测试方法及其原理和应用。

本书以专业学科分章,物理测试方面有金相分析、金属力学性能测试、电子光学分析、X射线衍射分析、金属材料物理性能测试和无损检测;化学分析方面有冶金化学分析概论、化学分析法、光学分析、电化学分析、核分析及质谱分析、相分析和冶金气体分析等。

全书每章由众多节组成,每节是一个完整的知识主题,它们所包含的知识互相衔接,构成该章完整的知识体系。

本书由钢铁研究总院及北京有色金属研究总院负责组织,邀请了包括四位中国科学院院士在内的二百多位专家共同编写,具有很强的权威性及参考价值,供从事金属材料生产、科研、教学、应用等方面的专业技术人员及理化测试人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

金属材料理化测试全书/屠海令,干勇主编. —北京:化学工业出版社,2006.6
ISBN 978-7-5025-8952-3

I. 金… II. ①屠…②干… III. ①金属材料-物理性质试验②金属材料-化学性质试验 IV. TG115

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 068609 号

“十一五”国家重点图书

金属材料理化测试全书

屠海令 干 勇 主编

责任编辑:丁尚林 陶艳玲

责任校对:陈 静 战河红

封面设计:张 辉

*

化学工业出版社出版发行

(北京市朝阳区惠新里3号 邮政编码 100029)

购书咨询:(010)64982530

(010)64918013

购书传真:(010)64982630

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

大厂聚鑫印刷有限责任公司印刷

三河市万龙印装有限公司装订

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 35¼ 彩插 3 字数 1212 千字

2007 年 1 月第 1 版 2007 年 1 月北京第 1 次印刷

ISBN 978-7-5025-8952-3

定 价:88.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者,本社发行部负责退换

《金属材料理化测试全书》编辑委员会

主 任：屠海令 干 勇

副主任：姚卫薰 江君照 王馨泽 赵新娜 姚建明

顾 问：姚元恺 高镇同(中国科学院院士)

秘 书：曹用涛 戚维懿 吴辛友 刘 英

委 员：(以姓氏笔画为序)

干 勇	王馨泽	尤清照	冯玉萍	朱 静*
刘 英	刘崇嗣	江君照	李方华*	吴辛友
张月霞	张英琪	陈华序	陈洪育	林树智
单华民	赵 坚	赵新娜	姚卫薰	姚元恺
姚建明	姚影澄	高英奇	高镇同	郭可信*
曹用涛	曹诗侗	戚维懿	屠海令	谢希文
臧慕文				

* 为中国科学院院士。

本书编写负责人员

主编：屠海令 干勇

第1章 金相分析

主编：姚卫薰 副主编：马燕文 李润慈

第2章 金属力学性能测试

主编：曹用涛 副主编：张金波

第3章 电子光学分析

主编：赵 坚 副主编：刘安生 李万通

第4章 X射线衍射分析

主编：陈洪育 副主编：何崇智

第5章 金属材料物理性能测试

主编：尤清照 副主编：郭一玲

第6章 无损检测

主编：冯玉萍 副主编：张广纯

第7章 冶金化学分析概论

主编：吴辛友 副主编：臧慕文 刘 英

第8章 化学分析法

主编：张英琪 副主编：臧慕文 陈华序

第9章 光学分析

主编：高英奇 副主编：高新华

第10章 电化学分析

主编：张月霞

第11章 核分析与质谱分析

主编：单华民 副主编：马树钦

第12章 相分析

主编：姚影澄 副主编：朱子长

第13章 冶金气体分析

主编：刘崇嗣 副主编：余新昌 陈文绣

前 言

新中国成立后，特别是自改革开放以来，我国冶金工业得到很快的发展。冶金科技一些领域达到或接近世界先进水平，各个领域都积累了丰富的经验。为了汇集和传播冶金科学技术知识，原冶金工业部和原中国有色金属工业总公司决定编制一套冶金科学技术知识的大型专业性工具书，《金属材料理化测试全书》是其中独立的一卷。该卷由钢铁研究总院和北京有色金属研究总院负责组织编写。

《金属材料理化测试全书》阐述了金属材料的化学成分、宏观和微观组织结构、金属材料的缺陷、力学及其他各种物理性能的分析测试方法及其原理和应用。正确地应用各种理化测试方法，对于科学地评价金属材料的性能和质量，深层次地认识金属材料的成分、组织与性能的内在规律，以及对金属材料的正确使用，具有重要的实际意义。本书出版的目的是向读者提供金属材料理化测试的基本知识和可靠的科学依据，普及这方面的科学技术知识，促进金属材料理化测试更为广泛和正确地应用。

全书按专业学科分为13章，物理测试部分包括金相分析、金属力学性能测试、电子光学分析、X射线衍射分析、金属材料物理性能测试和无损检测；化学分析部分包括冶金化学分析概论、化学分析法、光学分析、电化学分析、核分析与质谱分析、相分析和冶金气体分析。全书每章由众多节组成，每节是一个完整的知识主题，它们所包含的知识互相衔接，构成该章完整的知识体系。

本书的读者对象主要是从事金属材料的生产、科研、教学、使用等方面的专业技术人员及理化测试人员。

本书编辑委员会组织领导全书的编写组织工作，聘请各专业学科分支的负责人，编制全书的框架提纲，拟定各章节的撰稿人。中国科学院高镇同院士担任本书编辑委员会顾问，中国科学院郭可信院士、朱静院士、李方华院士撰写了有关章节。聘请的撰稿人有教授、研究员、高级工程师和经验丰富的专家，共二百余人。经过撰写、修改、审稿，最后由化学工业出版社编辑出版。在此谨向全体作者、编审人员及其所在单位，参加全书化学分析部分前期编审工作的李玉珍和后期修改工作的北京科技大学鲁毅强、温美娟、刘杰民、李建强，北京有色金属研究总院的孙泽明、高志祥、张英新等同志，以及化学工业出版社，致以衷心的感谢。

当代科学技术发展迅速，电子计算机在测试仪器的控制和数据图像处理方面得到广泛应用，金属材料理化测试技术和仪器装备不断有新的发展，对如何编写此类专业工具书我们缺乏经验，书中难免存在疏漏，恳请读者给予批评指正。

《金属材料理化测试全书》编辑委员会

2006年6月

目 录

上篇 物理测试

第 1 章 金相分析	2	1.1.20 粗晶环	19
1.1 宏观分析	5	1.1.21 流纹不顺	19
1.1.1 宏观断口分析	6	1.1.22 焊合不良	20
1.1.1.1 纤维状断口	7	1.1.23 压折	20
1.1.1.2 瓷状断口	7	1.1.24 针孔	20
1.1.1.3 撕痕状断口	7	1.2 金相	20
1.1.1.4 台状断口	8	1.2.1 金相试样制备	20
1.1.1.5 层状断口	8	1.2.2 显微组织显示	22
1.1.1.6 内裂断口	8	1.3 金相显微镜	25
1.1.1.7 石状断口	8	1.3.1 金相显微镜附件	28
1.1.1.8 蒸痕断口	9	1.3.1.1 相衬装置	28
1.1.1.9 黑脆断口	9	1.3.1.2 干涉显微装置	28
1.1.1.10 白点断口	9	1.3.1.3 偏光装置	28
1.1.1.11 结晶状断口	10	1.3.1.4 微差干涉衬度装置	29
1.1.1.12 气泡断口	10	1.3.1.5 暗场装置	29
1.1.1.13 非金属夹杂物断口	10	1.3.1.6 显微镜照相装置	30
1.1.1.14 异金属夹杂物断口	11	1.3.1.7 显微摄影	30
1.1.1.15 缩孔残余断口	11	1.3.2 高温金相显微镜	30
1.1.1.16 沿晶断口	11	1.3.3 体视显微镜	31
1.1.1.17 氧化膜断口	12	1.3.4 显微硬度	31
1.1.2 偏析	12	1.3.4.1 显微硬度分析	32
1.1.3 疏松	14	1.4 显微分析	33
1.1.4 缩孔	14	1.4.1 典型显微组织	33
1.1.5 气泡	14	1.4.1.1 带状组织	33
1.1.6 翻皮	15	1.4.1.2 网状组织	33
1.1.7 轴心晶间裂纹	15	1.4.1.3 碳化物液析	34
1.1.8 白点	15	1.4.1.4 魏氏组织	34
1.1.9 发纹	16	1.4.1.5 奥氏体钢中的 α 相	34
1.1.10 外来非金属夹杂物	16	1.4.1.6 球化体	34
1.1.11 异金属夹杂物	16	1.4.1.7 过热组织	35
1.1.12 冷隔	16	1.4.1.8 过烧组织	35
1.1.13 分层	17	1.4.1.9 脱碳组织	35
1.1.14 成层	17	1.4.1.10 碳化物不均匀性	35
1.1.15 光亮晶粒	17	1.4.1.11 游离渗碳体	36
1.1.16 白斑	18	1.4.1.12 石墨相	36
1.1.17 大晶粒	18	1.4.1.13 磷共晶	37
1.1.18 羽毛状晶	18	1.4.1.14 莱氏体	37
1.1.19 挤压缩尾	19	1.4.1.15 一次渗碳体	37
		1.4.1.16 晶粒度	37

1.4.1.17 铜扩散	38	2.5.3 落锤试验	79
1.4.2 非金属夹杂物	38	2.5.4 金属高温冲击试验	79
1.4.2.1 非金属夹杂物的金相评定	40	2.5.5 低温冲击试验	79
1.4.2.2 铜中氧含量测定	40	2.6 金属硬度试验	79
1.5 定量金相学	41	2.6.1 金属布氏硬度试验	80
1.5.1 定量金相技术	44	2.6.2 金属洛氏硬度试验	80
1.5.2 图像分析仪	46	2.6.3 金属的表面洛氏硬度试验	81
参考文献	47	2.6.4 金属维氏硬度试验	81
第2章 金属力学性能测试	48	2.6.5 金属肖氏硬度试验	82
2.1 拉伸试验	52	2.6.6 金属显微维氏硬度试验	82
2.1.1 拉伸试样	56	2.6.7 金属努氏硬度试验	82
2.1.2 引伸计	57	2.7 金属扭转试验	82
2.1.3 真实应力-应变曲线	58	2.8 金属压缩试验	84
2.1.4 高温拉伸试验	59	2.9 金属剪切试验	84
2.1.5 低温拉伸试验	59	2.10 金属磨损试验	85
2.2 断裂韧性试验	59	2.11 金属工艺性能试验	86
2.2.1 平面应变断裂韧性试验	61	2.11.1 金属顶锻试验	86
2.2.2 平面应力断裂韧性试验	62	2.11.2 金属弯曲试验	86
2.2.3 R阻力曲线	63	2.11.3 金属杯突试验	87
2.2.4 动态撕裂试验	64	2.11.4 金属反复弯曲试验	87
2.2.5 金属板材表面裂纹断裂初度试验	64	2.11.5 金属线材缠绕松懈试验	88
2.2.6 金属腐蚀介质断裂初度试验	65	2.11.6 金属线材扭转试验	88
2.2.7 金属的动态断裂初度试验	65	2.11.7 金属薄板双层咬合弯曲试验	88
2.3 疲劳试验	66	2.11.8 金属不淬硬性弯曲试验	89
2.3.1 高周疲劳试验	68	2.11.9 金属锻平试验	89
2.3.2 低周疲劳试验	70	2.11.10 钢的应变时效敏感性试验	89
2.3.3 弯曲疲劳试验	70	2.11.11 金属线材反复弯曲试验	90
2.3.4 拉压疲劳试验	71	2.11.12 金属管压扁试验	90
2.3.5 扭转疲劳试验	71	2.11.13 金属管扩口试验	90
2.3.6 复合应力疲劳试验	71	2.11.14 金属缩口试验	91
2.3.7 程序疲劳试验	71	2.11.15 金属管卷边试验	91
2.3.8 随机疲劳试验	72	2.11.16 金属管弯曲试验	92
2.3.9 高温疲劳试验	72	2.11.17 金属管液压试验	92
2.3.10 热疲劳试验	73	参考文献	92
2.3.11 腐蚀疲劳试验	73	第3章 电子光学分析	93
2.3.12 接触疲劳试验	73	3.1 电子显微镜	93
2.3.13 冲击疲劳试验	74	3.1.1 透射电子显微术	95
2.3.14 疲劳断口分析	74	3.1.1.1 像衬度	96
2.3.15 概率密度函数	75	3.1.1.2 明场像和暗场像	96
2.3.16 疲劳损伤测定	75	3.1.1.3 衍射理论	96
2.3.17 疲劳裂纹扩展速率测定	76	3.1.1.4 特殊成像技术	98
2.4 高温长时力学性能试验	76	3.1.1.5 罗伦茨显微术	99
2.4.1 蠕变试验	76	3.1.2 高分辨电子显微术	99
2.4.2 持久强度试验	77	3.1.2.1 相位体	100
2.4.3 应力松弛试验	77	3.1.2.2 衬度传递函数	100
2.5 冲击试验	78	3.1.2.3 最佳欠焦条件	100
2.5.1 夏比冲击试验	78	3.1.2.4 系列离焦像	101
2.5.2 仪器化冲击试验	78	3.1.2.5 高分辨像的模拟计算	101

3.1.2.6	点阵像	101	3.2.4.1	ZAF 修正	126
3.1.2.7	结构像	101	3.2.4.2	逃逸峰剥离	126
3.1.2.8	单原子像	101	3.2.4.3	X 射线能谱无标样定量分析	126
3.1.3	电子衍射	101	3.2.4.4	蒙特卡罗模拟	127
3.1.3.1	倒易点阵	102	3.3	表面分析技术	127
3.1.3.2	高能电子衍射	102	3.3.1	俄歇电子能谱术	130
3.1.3.3	选区电子衍射	102	3.3.1.1	电子能量分析器	131
3.1.3.4	高阶劳厄区衍射图	103	3.3.1.2	半球分析器	131
3.1.3.5	高分辨率电子衍射	103	3.3.1.3	筒镜型分析器	131
3.1.3.6	额外电子衍射	103	3.3.1.4	阻滞场型分析器	132
3.1.3.7	反射电子衍射	103	3.3.1.5	127°柱偏型分析器	132
3.1.3.8	低能电子衍射	103	3.3.1.6	平面镜分析器	132
3.1.3.9	菊池衍射图	104	3.3.2	化学分析用电子能谱术	132
3.1.3.10	会聚束电子衍射	104	3.3.3	紫外光电子能谱术	133
3.1.4	分析电子显微术	104	3.3.3.1	化学位移	134
3.1.4.1	透射扫描像	106	3.3.3.2	低能离子散射谱术	134
3.1.4.2	微束衍射	106	3.3.4	场离子显微镜	135
3.1.4.3	电子能量损失谱	106	3.3.5	场发射显微镜	136
3.1.4.4	能量过滤像	107	3.4	激光分析技术	137
3.1.4.5	透射电镜中 X 射线能谱学	107	3.4.1	激光拉曼光谱术	137
3.1.4.6	广延细结构	108	3.4.2	激光质谱术	138
3.1.4.7	电子通道增强原子位置微 分析技术	108	3.4.3	激光探针	141
3.1.5	高压电子显微术	108	3.4.4	氦化技术	141
3.1.5.1	原位观察	110	3.5	工业断层扫描术	142
3.1.5.2	电子辐照效应	110	3.6	薄膜分析	143
3.1.5.3	临界电压效应	111	3.6.1	薄膜厚度测量	144
3.1.5.4	临界厚度	111	3.6.2	薄膜结构分析	144
3.1.6	透射电镜试样制备	112	3.6.3	薄膜成分分析	144
3.1.7	扫描电子显微术	113	3.7	微束分析技术	145
3.1.7.1	电子束轰击试样激发的信号	114	参考文献	145	
3.1.7.2	表面形貌衬度	115	第 4 章 X 射线衍射分析	147	
3.1.7.3	磁衬度	116	4.1	X 射线	148
3.1.7.4	原子序数衬度	116	4.1.1	X 射线谱	148
3.1.7.5	扫描电镜的焦深	116	4.1.2	莫塞莱定律	149
3.1.7.6	扫描电镜的 Y 调制像	116	4.1.3	X 射线吸收与散射	149
3.1.7.7	电子通道花样	116	4.1.4	X 射线晶体衍射	150
3.1.7.8	数字扫描图像技术	117	4.1.4.1	劳厄方程式	150
3.1.7.9	金属材料电子断口分析	117	4.1.4.2	布拉格定律	150
3.1.7.10	断口剖面技术	119	4.2	X 射线晶体学	150
3.1.7.11	蚀坑定向技术	119	4.2.1	晶体点阵	151
3.1.8	扫描隧道显微镜	121	4.2.2	对称性与晶体结构	152
3.2	电子探针分析	122	4.2.3	晶面间距	152
3.2.1	X 射线波谱仪	124	4.2.4	极射赤面投影	152
3.2.2	X 射线能谱仪	124	4.2.5	倒易点阵	152
3.2.2.1	能量分辨率	124	4.2.6	衍射强度	153
3.2.3	电子探针定性分析	124	4.3	X 射线衍射设备	154
3.2.4	电子探针定量分析	125	4.3.1	X 射线源	154
			4.3.2	X 射线照相机	155

4.3.3 X射线衍射仪	155	5.2.2 黏性	185
4.4 X射线分析	156	5.2.3 阻尼共振性	185
4.4.1 X射线物相定性分析	156	5.2.4 弹性后效	185
4.4.2 X射线物相定量分析	157	5.2.5 内耗	186
4.4.2.1 X射线定量相分析K值法	158	5.2.6 对数衰减率	186
4.4.2.2 残余奥氏体X射线测定法	158	5.2.7 机械品质因数	186
4.4.3 点阵参数的测定	158	5.2.8 衰减系数	186
4.4.3.1 固溶度测定	159	5.2.9 弛豫谱	187
4.4.4 单晶取向的测定	159	5.2.10 内耗测量方法	187
4.4.4.1 劳厄法	160	5.3 密度	188
4.4.5 多晶衍射晶体结构分析	160	5.3.1 密度测量方法	188
4.4.6 择优取向	161	5.4 热膨胀	189
4.4.6.1 极图	162	5.4.1 热膨胀系数	190
4.4.6.2 反极图	163	5.4.2 热膨胀系数的测量方法	190
4.4.6.3 取向分布函数	164	5.4.2.1 热膨胀测量的光杠杆法	190
4.4.7 内应力	166	5.4.2.2 热膨胀测量的机械杠杆法	191
4.4.7.1 X射线残余应力测定法	166	5.4.2.3 热膨胀测量的千分表法	191
4.4.8 X射线衍射线形分析	167	5.4.2.4 热膨胀测量的电感法	192
4.4.8.1 近似系数法	167	5.4.2.5 热膨胀测量的电容法	193
4.4.8.2 X射线衍射线形傅里叶级数 分析法	168	5.4.2.6 热膨胀测量的光干涉法	193
4.4.9 X射线晶粒度测定	169	5.4.2.7 热膨胀测量的直接观测法	194
4.4.10 X射线小角散射	169	5.5 热传导	194
4.4.11 X射线有序度测定	171	5.5.1 热导率	195
4.4.11.1 反相畴	171	5.5.2 热导率测量方法	195
4.4.12 X射线漫散射	172	5.5.2.1 热导率测量的平板法	195
4.4.12.1 调制结构	172	5.5.2.2 热导率测量的圆棒法	196
4.4.13 X射线衍衬貌相术	173	5.5.2.3 热导率测量直接通电加热法	197
4.4.14 双晶衍射术	174	5.5.2.4 热导率测量径向热流法	198
4.4.15 非晶态材料的结构分析	175	5.6 热扩散率	198
4.4.16 扩展X射线吸收谱	177	5.6.1 热扩散率测量方法	199
4.4.17 微束X射线衍射分析	178	5.6.1.1 周期热流法	199
4.4.18 高温X射线衍射分析	178	5.6.1.2 瞬态热流法	199
4.4.19 高压X射线衍射分析	179	5.7 热辐射	200
4.4.20 低温X射线衍射分析	179	5.7.1 热发射率	201
4.4.21 薄膜X射线衍射分析	179	5.7.2 热发射率测量方法	201
参考文献	180	5.7.2.1 热发射率测量的反射计法	201
第5章 金属材料物理性能测试	181	5.7.2.2 热发射率测量的辐射计法	202
5.1 弹性	181	5.7.2.3 热发射率测量的卡计法	202
5.1.1 杨氏模量	182	5.8 热容量	203
5.1.2 切变模量	182	5.8.1 比热容	203
5.1.3 泊松比	182	5.8.2 比热容的测量方法	203
5.1.4 体积模量	183	5.8.2.1 比热容测量的绝热量热计法	204
5.1.5 弹性波波速	183	5.8.2.2 比热容测量下落法	205
5.1.6 弹性测量方法	183	5.8.2.3 比热容测量的激光脉冲法	206
5.1.6.1 悬挂共振法	184	5.8.2.4 比热容测量的快速通电脉冲法	206
5.1.6.2 纵共振法	184	5.9 电阻	207
5.2 黏弹性	185	5.9.1 电阻率	208
5.2.1 滞弹性	185	5.9.2 电阻温度系数	208

5.9.3 电阻测量方法	209	6.1.6.5 板波探伤	230
5.9.3.1 伏安法	209	6.1.6.6 穿透法探伤	231
5.9.3.2 数字万用表法	209	6.1.7 缺陷尺寸定量分析	231
5.9.3.3 电桥法	211	6.1.8 超声频谱分析	231
5.9.3.4 涡流法	212	6.1.9 超声测厚	232
5.9.3.5 四探针法	213	6.2 射线检测	232
5.10 热电势	213	6.2.1 射线探伤	232
5.10.1 热电势的测量	214	6.2.1.1 X射线探伤	233
5.11 磁性	214	6.2.1.2 γ 射线探伤	234
5.11.1 宏观磁性测量	215	6.2.1.3 中子射线照相	234
5.11.1.1 磁通测量法	215	6.2.1.4 X射线工业电视检测	235
5.11.1.2 磁秤	215	6.2.1.5 计算机层析术	235
5.11.1.3 超导量子干涉器件磁强计	216	6.2.2 射线测厚	236
5.11.1.4 振动试样磁强计	217	6.2.3 辐射防护	237
5.11.1.5 提拉试样磁强计	217	6.3 涡流检测	238
5.11.1.6 居里温度测量	217	6.3.1 线圈阻抗及阻抗矢量图	238
5.11.1.7 磁场测量法	218	6.3.2 涡流检测有限元模型	239
5.11.1.8 音频磁性测量	219	6.3.3 涡流探伤	241
5.11.1.9 转矩磁强计	220	6.3.4 涡流测量	242
5.11.1.10 磁致伸缩系数的测量	220	6.3.5 涡流检测仪	242
5.11.2 微观磁结构分析	221	6.3.6 涡流检测线圈	244
5.11.3 磁畴观察	221	6.4 磁性探伤	245
参考文献	222	6.4.1 磁粉探伤	245
第6章 无损检测	223	6.4.2 电磁感应法	249
6.1 超声检测	224	6.4.3 磁电转换元件探伤法	249
6.1.1 超声传播	224	6.4.4 录磁探伤	249
6.1.2 超声换能器	225	6.5 渗透探伤	250
6.1.3 超声探头	226	6.6 激光全息检测	251
6.1.4 电磁超声换能器	226	6.7 声全息检测	252
6.1.5 超声波探伤仪	227	6.8 声发射检测	253
6.1.6 超声探伤	227	6.9 红外检测	254
6.1.6.1 直探头探伤	227	6.10 残余应力无损检测	254
6.1.6.2 斜探头探伤	228	6.11 泄漏检查	255
6.1.6.3 T-R 探头探伤	229	6.12 热电势检测法	256
6.1.6.4 水浸聚焦探伤	230	参考文献	256

下篇 化学分析

第7章 冶金化学分析概论	258	7.1.5 常用分离方法	262
7.1 冶金化学分析	258	7.1.6 一般分析步骤	262
7.1.1 简史	258	7.1.7 在冶金科研生产中的任务和作用	262
7.1.2 分类	260	7.1.8 展望	262
7.1.2.1 定性化学分析	260	7.2 试样预处理	263
7.1.2.2 定量化学分析	260	7.2.1 采样	263
7.1.2.3 相分析	261	7.2.1.1 试样	263
7.1.3 定量化学分析方法的特点	261	7.2.1.2 固体试样的采集	264
7.1.4 几类分析方法的定量范围	262	7.2.1.3 气体试样的采集	264
		7.2.1.4 液体试样的采取	265

7.2.2 制样	265	7.6.5 发展	280
7.2.2.1 破碎	265	7.7 过程分析化学	280
7.2.2.2 筛分	265	7.7.1 简史	280
7.2.2.3 缩分	265	7.7.2 过程分析的方式及特点	280
7.2.3 试样的分解	265	7.7.2.1 离线方式	281
7.2.3.1 试样分解方法	266	7.7.2.2 现场方式	281
7.2.3.2 试样分解技术	267	7.7.2.3 在线方式	281
7.3 标准物质和标准分析方法	268	7.7.2.4 内线方式	281
7.3.1 标准物质	268	7.7.2.5 非破坏性方式	281
7.3.1.1 简史	268	7.7.3 研究的基本内容	281
7.3.1.2 基本要求	269	7.7.3.1 取样系统	281
7.3.1.3 分类	269	7.7.3.2 检测及传感技术研究	281
7.3.1.4 作用	269	7.7.4 化学计量学方法在过程分析中的 应用研究	281
7.3.1.5 制备	269	7.7.4.1 仪器校正	281
7.3.2 标准分析方法	272	7.7.4.2 数学模型建立	282
7.3.2.1 标准分析方法与基准方法、 现场方法的区别	272	7.7.4.3 指导传感器组的设计	282
7.3.2.2 各国标准分析方法概况	272	7.7.5 优化与控制	282
7.3.2.3 我国标准分析方法的研究	273	7.7.6 发展趋势	282
7.3.2.4 我国标准分析方法的制订 程序	273	7.7.6.1 计算机的微型化与智能化	282
7.3.2.5 标准分析方法的精密度试验	274	7.7.6.2 多组分同时测定	282
7.4 色谱分析	275	7.7.6.3 取样系统不断更新	282
7.4.1 简史	275	7.7.6.4 分析仪器结构标准化	282
7.4.2 分类	275	7.8 分析化学计量学	282
7.4.2.1 按相的状态分类	276	7.8.1 简史	282
7.4.2.2 按固定相的性质分类	276	7.8.2 研究范围	283
7.4.2.3 按分离机理分类	276	7.8.2.1 分析数据的统计处理	283
7.4.2.4 按色谱动力学过程分类	276	7.8.2.2 实验设计	284
7.4.3 色谱理论	276	7.8.2.3 信号处理	285
7.4.4 应用	276	7.8.2.4 校正技术	285
7.5 痕量分析	277	7.8.2.5 化学模拟	286
7.5.1 发展概况	277	7.8.2.6 模式识别	286
7.5.2 痕量分析技术	277	7.8.2.7 数据库	286
7.5.2.1 痕量分析的检出限	278	7.8.2.8 专家系统	286
7.5.2.2 痕量分析的灵敏度	278	7.8.3 展望	287
7.5.2.3 痕量分析的空白值	278	参考文献	287
7.5.2.4 痕量分析中参数的控制	278	第8章 化学分析法	288
7.5.3 痕量分析的应用	278	8.1 化学分析中的分离技术	288
7.5.4 发展趋势与展望	279	8.1.1 沉淀分离法	290
7.6 流动注射分析	279	8.1.1.1 一般沉淀分离法	290
7.6.1 简史	279	8.1.1.2 共沉淀分离法	291
7.6.2 仪器装置	279	8.1.2 溶剂萃取分离法	291
7.6.2.1 溶液输送装置	279	8.1.2.1 简史	291
7.6.2.2 进样阀	279	8.1.2.2 基本原理	291
7.6.2.3 反应管路	280	8.1.3 气相色谱分离法	294
7.6.2.4 检测器	280	8.1.3.1 简史	294
7.6.3 特点	280	8.1.3.2 原理	294
7.6.4 应用	280	8.1.3.3 气相色谱仪	294

8.1.3.4 应用	295	9.1.2 原子吸收光谱分析	349
8.1.4 液相色谱分离法	295	9.1.2.1 火焰原子吸收光谱法	350
8.1.5 离子交换分离法	297	9.1.2.2 石墨炉原子吸收光谱法	352
8.1.6 萃取色谱分离法	299	9.1.2.3 原子吸收光谱仪	354
8.1.7 挥发与蒸馏分离法	300	9.1.2.4 背景校正	356
8.1.7.1 挥发法	300	9.1.2.5 原子化器	358
8.1.7.2 蒸馏法	300	9.1.2.6 氢化物发生器	360
8.1.8 浮选分离法	300	9.1.3 原子荧光光谱分析	360
8.1.9 选择性溶解分离法	301	9.1.3.1 原子荧光光谱仪	362
8.1.9.1 恒电位电解法	301	9.1.3.2 空心阴极灯	363
8.1.9.2 溶剂法	302	9.1.3.3 无极放电灯	364
8.1.10 火试金法	304	9.1.4 X射线荧光光谱分析	365
8.2 称量分析	308	9.1.4.1 X射线荧光光谱仪	367
8.2.1 沉淀	309	9.1.4.2 定量X射线荧光光谱分析	369
8.2.2 共沉淀	310	9.1.4.3 俄歇效应	372
8.2.3 均相沉淀	311	9.1.4.4 荧光产额	372
8.3 滴定分析	311	9.2 分子光谱分析	372
8.3.1 酸碱滴定法	313	9.2.1 分光光度分析	377
8.3.1.1 缓冲溶液	317	9.2.1.1 分光光度计	384
8.3.2 络合滴定法	318	9.2.1.2 显色反应	386
8.3.2.1 掩蔽和解蔽	320	9.2.2 荧光分光光度分析	391
8.3.3 氧化还原法	321	9.2.2.1 荧光分光光度计	393
8.3.4 沉淀滴定法	323	9.2.3 化学发光分析	394
8.3.5 光度滴定法	323	参考文献	396
参考文献	324	第10章 电化学分析	398
第9章 光学分析	325	10.1 电解分析法	399
9.1 原子光谱分析	328	10.1.1 恒电流电解法	401
9.1.1 原子发射光谱分析	333	10.1.2 控制电位电解法	401
9.1.1.1 火焰发射光谱分析	335	10.2 电化学分离法	402
9.1.1.2 分子发射腔分析	336	10.2.1 汞阴极电解法	402
9.1.1.3 激光微区光谱分析	336	10.2.2 内电解法	403
9.1.1.4 电感耦合等离子体发射光谱 分析	337	10.2.3 电泳法	403
9.1.1.5 电热蒸发发射光谱分析	337	10.2.4 电渗析法	404
9.1.1.6 化学光谱法	338	10.2.5 电移谱法	404
9.1.1.7 自电极光谱法	338	10.3 电滴定分析法	404
9.1.1.8 溶液干渣光谱法	339	10.3.1 电位滴定法	405
9.1.1.9 摄谱法光谱分析	339	10.3.2 电流滴定法	406
9.1.1.10 原子发射光谱仪	341	10.3.3 电导滴定法	406
9.1.1.11 光谱激发光源	342	10.3.4 交流示波极谱滴定法	407
9.1.1.12 等离子体光源	344	10.4 电位分析法	407
9.1.1.13 电感耦合等离子体光源	344	10.4.1 酸度计	408
9.1.1.14 单色仪	346	10.4.2 离子计	408
9.1.1.15 摄谱仪	346	10.4.3 离子选择性电极	409
9.1.1.16 直读光谱仪	347	10.4.3.1 玻璃电极	409
9.1.1.17 看谱镜	348	10.4.3.2 氟离子电极	409
9.1.1.18 测微光度计	348	10.4.3.3 氟硼离子电极	410
9.1.1.19 光谱映谱仪	348	10.4.3.4 气敏电极	410
		10.4.4 离子敏感场效应管	410
		10.4.5 电位溶出分析法	411

10.5 电化学检测器	411	11.1.5 同位素示踪	444
10.5.1 伏安检测器	412	11.1.6 固体径迹探测器	445
10.5.2 库仑检测器	412	11.1.7 核辐射探测器	445
10.5.3 电位检测器	412	11.1.8 γ 射线能谱仪	446
10.5.4 电容检测器	412	11.1.9 核探井技术	447
10.5.5 电导检测器	413	11.2 质谱分析	447
10.6 极谱分析法	413	11.2.1 火花源质谱分析	449
10.6.1 直流极谱法	414	11.2.1.1 相对灵敏度系数	451
10.6.2 单扫描示波极谱法	415	11.2.2 同位素质谱分析	451
10.6.3 络合吸附极谱波	416	11.2.3 电感耦合等离子体质谱分析	453
10.6.4 极谱催化波	418	11.2.4 辉光放电质谱分析	453
10.6.5 线性扫描伏安法	419	11.2.5 同位素稀释质谱分析	454
10.6.5.1 溶出伏安法	420	11.2.6 二次离子质谱分析	455
10.6.5.2 吸附溶出伏安法	421	11.2.7 质谱仪器	456
10.6.5.3 卷积伏安法	421	11.2.7.1 离子源	458
10.6.6 工作电极	422	11.2.7.2 质量分析器	460
10.6.6.1 滴汞电极	422	11.2.7.3 离子检测器	461
10.6.6.2 悬汞电极	422	11.2.7.4 质量分辨率	462
10.6.6.3 固体电极	422	11.2.7.5 质量色散	462
10.6.6.4 化学修饰电极	423	11.2.8 单聚焦质谱计	462
10.6.6.5 双电极体系	424	11.2.9 火花源双聚焦质谱仪	463
10.6.6.6 三电极体系	424	11.2.10 色谱-质谱计	464
10.7 库仑分析法	424	11.2.11 四级质谱计	465
10.7.1 控制电位库仑分析法	425	11.2.12 二次离子质谱仪	466
10.7.2 恒电流库仑滴定法	427	11.2.13 质量歧视	467
10.7.3 微库仑分析	430	参考文献	467
参考文献	430	第12章 相分析	469
第11章 核分析与质谱分析	431	12.1 合金相分析	469
11.1 核分析	431	12.1.1 合金相	470
11.1.1 活化分析	432	12.1.1.1 基体相	470
11.1.1.1 中子活化分析	434	12.1.1.2 金属间化合物	471
11.1.1.2 带电粒子活化分析	435	12.1.1.3 碳化物相	472
11.1.1.3 γ 光子活化分析	436	12.1.1.4 硼化物相	474
11.1.1.4 快中子非弹性散射瞬发 γ 射线分析	437	12.1.2 非金属夹杂物相	474
11.1.2 离子束分析	437	12.1.3 合金相分离	474
11.1.2.1 背散射分析	438	12.1.3.1 电化学分相法	474
11.1.2.2 离子沟道分析	438	12.1.3.2 二次电解分相法	480
11.1.2.3 超灵敏质谱	439	12.1.3.3 化学分相法	480
11.1.2.4 核反应分析	439	12.1.3.4 物理分相法	481
11.1.2.5 质子激发X射线发射分析	440	12.1.3.5 差热分析——逸气分析	482
11.1.2.6 同位素源激发X射线荧光分析	440	12.1.4 合金相定性分析	482
11.1.3 正电子湮没技术	441	12.1.5 合金相定量分析	483
11.1.3.1 穆斯堡尔谱学	441	12.1.5.1 提取定量相分析法	484
11.1.3.2 超精细结构	442	12.1.5.2 浸蚀定量相分析法	485
11.1.3.3 核磁共振	442	12.1.5.3 图像分析法	485
11.1.4 中子散射	443	12.1.5.4 表层相分析	485
		12.1.5.5 焊缝相分析	486
		12.1.5.6 钢铁相分析	486

12.1.5.7 高温合金相分析	486	13.1.3.3 固溶氮的分析	507
12.1.5.8 粉末冶金材料相分析	487	13.1.4 金属中氢的分析	508
12.1.5.9 难溶合金相分析	488	13.1.4.1 热抽取法定氢	509
12.1.5.10 轻合金相分析	488	13.1.4.2 熔融抽取法定氢	510
12.1.5.11 铜基合金相分析	489	13.1.4.3 扩散氢的测定	510
12.2 化学物相分析	489	13.1.4.4 熔融态金属中氢的测定	511
12.2.1 化学物相分析的相	493	13.1.4.5 钢水中氢的测定	512
12.2.1.1 自由氧化铜	493	13.1.5 金属中氧的分析	513
12.2.1.2 结合氧化铜	493	13.1.5.1 氢还原法定氧	514
12.2.1.3 磁性铁	493	13.1.5.2 固体电解质浓差电池法定氧	515
12.2.1.4 有效氧	493	13.1.6 金属中气体的测定仪	516
12.2.2 矿石化学物相分析方法	493	13.2 金属中硫的分析	517
12.2.3 冶金物料化学物相分析方法	496	13.3 金属中碳的分析	519
12.3 价态分析	498	13.4 冶金炉气分析	521
参考文献	499	13.4.1 炉气在线分析	523
第 13 章 冶金气体分析	500	13.4.2 高炉炉气分析	524
13.1 金属中气体分析	501	13.4.3 转炉炉气分析	524
13.1.1 真空熔融气体分析	503	13.4.4 焙烧炉炉气分析	524
13.1.2 惰气熔融气体分析	505	13.4.5 沸腾焙烧炉炉气分析	524
13.1.3 金属中氮的分析	506	13.4.6 鼓风炉炉气分析	525
13.1.3.1 克氏法定氮	506	13.4.7 反射炉炉气分析	525
13.1.3.2 氧化熔融法定氮	507	参考文献	525

附录 金属理化测试国家标准	526
----------------------------	-----

第1章 金相分析

(metallographic examination)

金相分析是运用放大镜和显微镜, 根据对金属材料的宏观及微观组织进行观察研究的方法, 生产实际中常称为金相检验。宏观组织是用10倍以下的放大镜或人眼睛直接观察到的金属材料内部所具有的各组成物的直观形貌, 微观组织主要是指在光学显微镜下所观察到的金属材料内部具有的各组成物的直观形貌。

(1) 历史 在人类开始使用金属的早期, 用肉眼观察金属材料的表面和断口的宏观缺陷。1840年宏观断口分析用来评价金属的性质, 随着生产和科学技术的发展, 宏观分析的许多方法作为标准, 对金属材料进行检测。用显微镜研究金属材料的组织要追溯到100多年以前, 1860年索拜(H. C. Sorby)开始运用显微镜观察研究金属内部的组织, 1864年他在历史上第一次发表了研究成果。1916年在美国材料试验学会的会议上, 确认金相微观分析是研究和检验金属材料组织的有效手段。发展到今天, 各国金属材料生产中, 控制质量的物理测试, 有相当数量的项目是金相检验。

近年来金相技术的发展有下列几方面: 试样制备由手工操作逐渐走向半自动化和自动化。相或组织组成物软硬相差很大的复合材料及硬度很大的金属陶瓷材料, 制备金相样品困难, 近年来在显微切片机的基础上研制出显微研磨机, 把磨光与抛光操作合并为一步短时完成, 效果极佳。薄膜干涉有效地用来显示难以浸蚀的合金和复合材料的显微组织, 丰富了金相分析技术。金相显微镜得到不断改进和完善, 高级显微镜向着小型化多功能发展。定量金相有很大发展。目前电子金相技术的应用, 对金属材料内部组织能更深入地进行研究, 但光学金相分析技术, 由于它具有观察范围大、使用方便、设备成本低、应用广泛等优点, 仍然具有强大的生命力, 新材料、新工艺、新产品的开发研究, 产品质量检测及失效分析等, 都离不开它。

(2) 显微组织分析 要正确地分析组织, 首先要知道合金的成分, 尤其是主要成分, 根据合金的成分, 查找相应的合金系相图。按合金的成分(主要成分)在相图上找到平衡状态时具有的相。用杠杆或重心规则测算其相对量, 作为判定相时的参数。对于一些较复杂的合金, 准确的相图找不到, 只能参照主要成分的相图, 根据所掌握的合金相、三元相图和三元

相图的基本知识, 推理判断组织中出现的各种相; 其次要知道该合金的历史, 即原料的纯度、冶炼方法、凝固过程、轧制工艺以及热处理规程等; 第三要知道试样截取的部位、取样方法、磨面方向、试样制备及组织显示方法等; 第四在显微镜下观察时, 先用低倍观察组织全貌, 其次用高倍对某些细节进行仔细观察, 最后根据需要, 再选用特殊金相分析方法, 先做相鉴定, 再做定量测试。定量测试可以对照半定量标准图, 也可用测量目镜测定。自动图像分析仪是金相定量测试的现代工具。光学金相技术还不能确定的合金相, 还需要用电子衍射方法和电子探针来确定。

(3) 单相多晶体等轴晶粒组织 纯金属和固溶体合金的退火组织, 经抛光浸蚀后呈多边形晶粒, 这是金相显微组织最简单的一类。研究这类组织时, 常常涉及到亚晶界。工业纯铁高温加热时形成大晶粒, 缓慢冷却后, 即得到亚晶界组织。亚晶界是小角度界面, 与晶界相比, 在同样浸蚀条件下浸蚀程度较轻。与晶界相交时, 常常接近直角。亚晶界是热稳定的, 过饱和固溶体分解时优先形成沉淀相的地方。在铁硅合金的研究中, 常常用蚀坑研究晶体取向、织构程度以及位错分布。

(4) 铸锭的宏观组织 大体积的液体注入锭模后, 沿铸模的横截面结晶而得到不均匀的组织, 表面层为细等轴晶, 中心区为大等轴晶, 其间为较粗大的柱状晶区。粗大柱状晶常常影响铸锭的成材和铸件的使用性能, 控制它的形成为人们所关注。合金成分对柱状晶的影响很大, 相图上液相线与固相线的垂直距离大者柱状晶小, 垂直距离小者柱状晶发达。 α -铝青铜的柱状晶比 α -锡青铜的柱状晶大得多, 前者相图的垂直距离约为 $10\sim 30^{\circ}\text{C}$, 而后的垂直距离约为 $100\sim 200^{\circ}\text{C}$ 。同理, 纯金属的柱状晶比合金的柱状晶严重。各种工业合金铸锭中的宏观偏析组织多出现在铸锭中上部, 在熔炼和浇注过程中应严加控制, 否则一旦形成便难以消除。

(5) 固溶体的铸态组织 固溶体合金的铸态组织, 具有树枝状特征。枝干与枝间化学成分不均匀, 称枝晶偏析(晶内分析)组织。这种组织对铸造高温合金是有益的, 它能增大高温强度, 而对一般加工形变的合金, 锻压时增加了形变阻力。可以用扩散退火以减少或消除这种不均匀组织。

(6) 具有共晶转变的组织 共晶组织的花样很