

# 金相分析原理及技术

任颂赞 叶 俭 陈德华 主编  
上海市机械制造工艺研究所有限公司 编

014009982

TG115.21  
07

# 金相分析原理及技术

任颂赞 叶 俭 陈德华 主编  
上海市机械制造工艺研究所有限公司 编



北航

C1696675

TG115.21  
07

上海图书馆  
上海科学技术文献出版社

S92200310

图书在版编目 (CIP) 数据

金相分析原理及技术 / 上海市机械制造工艺研究所有限公司  
编. — 上海: 上海科学技术文献出版社, 2013.8

ISBN 978-7-5439-5734-3

I. ①金… II. ①上… III. ①金相技术 IV. ①TG115.21

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 312603 号

责任编辑: 忻静芬

封面设计: 钱 祯



金相分析原理及技术

任颂赞 叶 俭 陈德华 主编

上海市机械制造工艺研究所有限公司 编

出版发行: 上海科学技术文献出版社

地 址: 上海市长乐路 746 号

邮政编码: 200040

经 销: 全国新华书店

印 刷: 常熟市人民印刷厂

开 本: 889×1194 1/16

印 张: 72.75

字 数: 2 252 000

版 次: 2013 年 8 月第 1 版 2013 年 8 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-5439-5734-3

定 价: 380.00 元

<http://www.sstlp.com>

## 内 容 提 要

本书是一部较完整的金相分析原理及金相分析技术方面的工具书。

全书共 36 章分为 6 篇:金属学及热处理原理基础、金相分析常用技术、金相常规项目检测、常用金属工程材料及金相分析、几种工艺条件下的金相分析以及金属构件失效分析概述等。本书从基础原理出发,介绍相关金相分析技术,着重阐述各种金属材料及各种工艺条件下的组织特征以及各种缺陷的诊断依据,尤其较全面介绍了各类适用的检测及评定标准。

本书可作从事金属工程材料加工、应用的工程技术人员的参考书,可作为大专院校制造科学与工程专业、材料科学与工程专业的参考用书以及自学、自修教材,也可作为制造业金相分析技术人员的培训教材。

作者(按姓氏笔画):

于 晖 马礼敦 马 鸣 马春霞 卞晓峰 王平生 王志明 王 洪  
王 琦 王 超 计 波 史妙英 叶 雷 龙荷荪 任颂赞 朱会文  
朱祖昌 许 雯 吴晓春 张文元 张佳蓉 张 岸 张 颖 张静江  
李响妹 陆 昕 陈质如 陈德华 林文松 苑 杰 金 刚 哈胜男  
祝新发 贺 章 顾 正 高汉文 韩德伟

审核(按姓氏笔画):

马礼敦 王丽莲 叶 俭 任颂赞 曲金光 朱祖昌 张士林 张光钧  
李光瑾 陈德华 周子年 倪晓峰 高汉文 黄志锋 曾小勤 谢维立  
蔡 红 薄鑫涛

参与编写、审稿人员所在单位(不分先后):

上海市机械制造工艺研究所有限公司  
复旦大学 分析测试中心  
上海交通大学  
上海工程技术大学  
上海理工大学  
上海大学  
中南大学  
上海奥盛集团  
上海电气电站设备有限公司汽轮机厂  
上海工具厂有限公司  
上海柴油机股份有限公司  
上海轴承研究所  
北京中科科仪计算技术有限责任公司  
上海机动车检测中心  
上海大众汽车有限公司  
上海大隆链条有限公司  
上海大隆热加工工程有限公司  
克莱斯勒亚太投资有限公司  
宝钢特种材料有限公司  
宝钢钢构有限公司  
徕卡仪器有限公司  
加拿大原子能研究所  
官电高周波设备(上海)有限公司

# 前 言

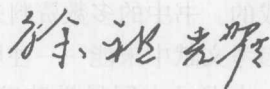
现代机械制造业被要求:在节能、减排的条件下,不但能制造出外形尺寸精确的制品,更须设计和产出具有精确内部组织的构件。这是因为,制品的质量(包括表面质量)不但决定于制品材料的成分,还决定于材料的组织。因此,制品材料组织的设计、成型和检测已成为制造业的关键知识和技术。

1987年,上海市机械制造工艺研究所组织编写、出版了《金相分析技术》一书,为制造业人员提供实用资料,为工程技术人员提高金相分析技术水平,从而为制品质量的保证起了积极的作用。

近年来,我国已跃居世界制造大国,但远非制造强国。人们期待着将“中国制造”变为“中国创新”。上海市机械制造工艺研究所有限公司领导顺应广大读者要求,为培育科学素质较高、富有技术创新能力的金相分析科技人员,拟在《金相分析技术》的基础上,组织人力(包括所外人员),加强基础(扩展如相图、相变基础),扩充不同材料类别的组织检测方法,可贵的是:还列出很多实用性的评定标准(包括国家标准)等。编写出版《金相分析原理及技术》一书,历时三年多,现已脱稿付梓。该书内容充实,可作为制造业金相分析技术人员的培训教材,作为大专院校制造科学与工程专业、材料科学与工程专业的参考用书以及自学、自修的核心教材。该书由任颂赞、叶俭和陈德华三位教授级高级工程师、高级工程师主编,作者及审核人员共五十余位。他们的爱国精神和付出的辛勤劳动,令人崇敬。

科学技术在不断发展。如在材料相变领域,诸多问题尚无定论。如 Spinodal 分解,按 John Cahn-Hilliard 热力学平均场理论,它在形核—长大析出之间应呈拐点;而按 Binder 等统计力学短程理论,两者是连续的,这些理论尚待梳理,作出判断。对贝氏体相变机制,虽然近年来未有更多学者投入扩散学派,但有待新的确切实验结果给出定论。因此,目前关于合金元素对贝氏体相变的影响,扩散学派持以合金元素对扩散的影响,而切变学派则以对切变影响作出解释。

再者,涉及外场(主要是应力场和磁场)对热处理(相变、晶粒变化、应力态等)影响的不少成果已在期刊上发表。本人多年来力推材料加工(形变)与热处理(或多场处理)一体化处理,以提高制品质量(或创立新的性能)、降低成本和改善环境影响。希望有关科技人员还宜关注有关新的科技文献,发展新的制品材料及工艺,愿共同为祖国强盛奉献全力。



中国科学院院士

2012年12月16日

# 前 言

由上海市机械制造工艺研究所组织编写(高汉文负责主编)的《金相分析技术》一书出版已有 25 年了,但至今仍在被查阅、被一些论文引用,表明该书仍有一定的适用性,也反映出一种需求。

然而,25 年来,随着以信息化技术为标志的现代科学技术的突飞猛进,新材料、新工艺不断涌现,相应的金相分析技术也与时俱进,分析方法有创新、检测手段有发展。同时,反映新材料、新工艺以及相应检测方法的新标准相继问世,历年颁布的相关标准也不断被修订,尤其是我国的制造业正走向国际市场,科研生产逐步趋向全球化,相关的材料工艺及检测标准也必须与国际接轨,从而推进了标准的国际化。为反映这些发展及进步,上海市机械制造工艺研究所有限公司近期再次组织长期从事科研、教育和生产的材料科技工作人员、专家编写这本《金相分析原理及技术》工具书,以适应广大金相分析工作者、材料工艺科技工作者、工程技术人员的需求,以推进我国金相检测水平的整体提升。

本书是在参考《金相分析技术》基础上,并根据部分读者的建议,全面扩充、重新编写的,仍坚持以科学性、实用性及可操作性为特色。全书共 36 章,分为 6 篇:金属学及热处理原理基础(第 1 章~第 4 章)、金相分析常用技术(第 5 章~第 11 章)、金相常规项目检测(第 12 章~第 15 章)、常用金属工程材料及金相分析(第 16 章~第 28 章)、几种工艺条件下的金相分析(第 29 章~第 33 章)及金属构件失效分析概述(第 34 章~第 36 章)。本书从基础原理出发,介绍相关分析技术,着重阐述各种材料及工艺条件下的组织特征以及各种缺陷的诊断依据,尤其较全面介绍了各类适用的检测及评定标准。对于金相分析而言,其结果应具有一定的科学性、可比对性以及可交流性,这就要求相应检测及评定标准必须统一、一致。因此,本书尽可能地介绍相关适用的国家标准、行业标准及相应的国外、国际标准。

参加本书编写及审稿人员有大专院校的教授、科研院所及大型企业的研究员、高级工程师以及长期工作在材料、工艺、金相检测第一线的专家、科技工作者。本所金相室的同志们对本书的文字、图片整理也付出了辛勤劳动。对这些作者、审阅专家及相关人员付出的辛劳,以及这些人员所在单位所给予的支持在此表示感谢。

金相分析从原理到技术,涉及领域极广,也经历了很长的发展历程,许多前辈、许多科技工作者,在金相分析(包括失效分析)方面做了大量工作,发表出版了许多著作。本书是在总结前人研究成果的基础上完成的。书中的多数资料来自文献、来自出版的著作、手册,尤其选用了其中一些图片、图表,其中有部分在参考文献中未能一一注明,在此特此说明,一并表示诚挚的感谢。

本书承中国科学院院士、国际著名相变专家和材料科学家徐祖耀教授撰写序言,在此深表敬意及感谢。

我们希望这本再次组织编写的金相分析方面的工具书能为广大材料、工艺科技人员、金相分析工作者提供更多、更实用的帮助。书中难免有不妥、疏漏或错误之处,仍期望专家、学者和广大读者不吝指正。

编者

2012 年 12 月

# 目 录

## CONTENTS

### 第一篇 金属学及热处理原理基础

第1章 金属和合金的结构	2	2.2.3 包晶相图和合金的结晶	33
1.1 晶体中原子间的键合	2	2.2.4 共析相图	35
1.1.1 金属键	2	2.2.5 二元系合金相图的应用	35
1.1.2 共价键	2	2.3 Fe-Fe <sub>3</sub> C和Fe-C相图和应用	37
1.1.3 离子键	3	2.3.1 铁碳合金的基本相	37
1.1.4 范德瓦耳斯键	3	2.3.2 铁碳合金的平衡结晶过程和组织	38
1.1.5 混合键	4	2.4 三元系合金相图简介	42
1.2 晶体结构基础	4	2.4.1 三元系合金相图基本构成	42
1.2.1 晶系和布拉菲点阵	4	2.4.2 Fe-N-C三元系相图实例	43
1.2.2 晶面指数和晶向指数	5	参考文献	44
1.2.3 晶带和晶带定律	7	第3章 钢在加热及冷却过程中的组织转变	45
1.2.4 晶面间距	7	3.1 钢在加热过程中的组织转变	45
1.3 金属的晶体结构	8	3.1.1 钢中奥氏体的形成	45
1.3.1 典型的金属晶体结构	8	3.1.2 奥氏体的形成方式及影响因素	47
1.3.2 3种晶体结构的特征	9	3.1.3 奥氏体晶粒长大及影响因素	49
1.4 合金相的晶体结构	11	3.2 钢在冷却过程中的组织转变	50
1.4.1 合金的组元、相及组织	11	3.2.1 过冷奥氏体的等温转变	50
1.4.2 固溶体	12	3.2.2 过冷奥氏体的连续冷却转变	52
1.4.3 中间相结构	14	3.2.3 过冷奥氏体的珠光体转变	53
1.4.4 超结构(有序固溶体)	17	3.2.4 过冷奥氏体的马氏体转变	58
1.5 晶体缺陷	17	3.2.5 过冷奥氏体的贝氏体转变	67
1.5.1 点缺陷	17	3.3 淬火钢回火时的组织转变	74
1.5.2 线缺陷	18	3.3.1 淬火钢回火时的组织转变	75
1.5.3 面缺陷	20	3.3.2 马氏体回火后的组织	76
参考文献	21	3.3.3 淬火钢回火后力学性能变化	77
第2章 合金相图	23	3.3.4 钢中贝氏体的回火转变	78
2.1 单元系相图和金属结晶	23	3.3.5 淬火钢的回火脆性	78
2.1.1 单元系相图 and 同素异构转变	23	3.4 其他固态相变简介	79
2.1.2 纯金属结晶	24	3.4.1 调幅分解转变	79
2.2 二元系合金相图和合金的结晶	27	3.4.2 合金的时效强化转变	81
2.2.1 匀晶相图和合金的结晶	28		
2.2.2 共晶相图和合金的结晶	31		



参考文献	81	4.5.2. 改变共析含碳量	92
<b>第4章 合金元素在钢中的作用</b>	83	4.5.3. 改变奥氏体的最大溶碳量	92
4.1 合金元素与铁的交互作用	83	<b>4.6 合金元素对钢热处理过程中组织转变的影响</b>	93
4.1.1 合金元素对 Fe-M 相图影响	83	4.6.1 合金元素对钢加热转变的影响	93
4.1.2 合金元素与铁的交互作用	84	4.6.2 合金元素对钢冷却转变的影响	94
4.1.3 硼和铁的交互作用	85	4.6.3 合金元素对淬火钢回火转变的影响	96
<b>4.2 合金元素与碳的交互作用</b>	85	<b>4.7 合金元素对钢力学性能的影响</b>	98
4.2.1 形成碳化物的稳定程度	85	4.7.1 合金元素对退火(或正火)状态下钢的力学性能的影响	98
4.2.2 形成碳化物的类型	85	4.7.2 合金元素对淬火回火状态下钢的力学性能的影响	99
4.2.3 碳化物的相互溶解及作用	87	4.7.3 合金元素对钢在高温及低温时力学性能的影响	100
<b>4.3 合金元素间相互作用和金属间化合物</b>	87	<b>4.8 合金元素在钢中的分布</b>	100
4.3.1 金属间化合物	87	附录	102
4.3.2 合金元素与氮的交互作用	90	参考文献	104
<b>4.4 合金元素与钢中晶体缺陷交互作用</b>	91		
4.4.1 合金元素与位错的交互作用	91		
4.4.2 合金元素与晶界的交互作用	91		
4.4.3 合金元素与亚晶界的交互作用	91		
4.4.4 合金元素与晶粒的交互作用	91		
<b>4.5 合金元素对 Fe-Fe<sub>3</sub>C 状态图的影响</b>	92		
4.5.1. 改变共析温度(A <sub>1</sub> )	92		

## 第二篇 金相分析常用技术

<b>第5章 金相显微镜及应用</b>	106	<b>5.4 金相显微镜主要技术参量</b>	125
5.1 金相显微镜分类及基本组成	106	5.4.1 显微镜的总有效放大率	125
5.1.1 金相显微镜的分类	106	5.4.2 金相显微镜的分辨力、工作距离	127
5.1.2 金相显微镜的基本组成	107	5.4.3 主要几何尺寸	127
<b>5.2 光学的基本概念及显微放大原理</b>	107	5.4.4 实际视场	128
5.2.1 光的基本特性	107	<b>5.5 金相显微镜的几种观察方法</b>	128
5.2.2 光的反射和折射	108	5.5.1 明场观察	129
5.2.3 反射镜和棱镜	110	5.5.2 暗场观察	129
5.2.4 透镜及成像原理	110	5.5.3 偏振光观察	130
5.2.5 透镜的像差	112	5.5.4 微分干涉相衬观察	132
5.2.6 金相显微镜放大原理和光学特点	114	<b>5.6 金相显微摄影操作要点</b>	133
<b>5.3 金相显微镜的基本组件</b>	114	5.6.1 样品要求	133
5.3.1 物镜	115	5.6.2 操作要求	133
5.3.2 目镜	119	<b>5.7 金相显微镜的安装、检定及维护</b>	133
5.3.3 照明系统	119	5.7.1 金相显微镜的安装	133
5.3.4 光阑	121	5.7.2 金相显微镜的检定	133
5.3.5 滤光片	121	5.7.3 金相显微镜的品质及维护	134
5.3.6 显微镜镜架系统	123	<b>5.8 典型金相显微镜介绍</b>	135
5.3.7 显微摄像系统	124	5.8.1 全自动金相显微镜	136
5.3.8 偏光、相衬等其他附件	125	5.8.2 电动金相显微镜	136

5.8.3 普及型金相显微镜 .....	136	7.3 显微维氏和努氏硬度试验方法及压头的比较 .....	172
参考文献 .....	136	7.3.1 试验压头的比较 .....	172
<b>第6章 定量金相及金相图像分析系统</b> .....	137	7.3.2 试验方法及应用比较 .....	173
6.1 体视学简介 .....	137	7.4 影响显微硬度试验结果的因素 .....	174
6.2 定量金相技术 .....	138	7.4.1 硬度计的影响 .....	174
6.2.1 半定量测量——比较法 .....	138	7.4.2 试样的影响 .....	175
6.2.2 定量测量方法 .....	138	7.4.3 操作的影响 .....	175
6.2.3 定量测量的误差统计分析 .....	140	7.4.4 压痕异常判断 .....	176
6.3 定量金相测量试样要求 .....	141	7.5 显微硬度计 .....	177
6.4 金相图像分析系统 .....	141	7.5.1 哈纳门(Hanemann)型显微硬度计 .....	177
6.4.1 金相数字图像定量测量基本方法 .....	142	7.5.2 早期手动显微硬度计 .....	178
6.4.2 金相图像分析基本构成 .....	143	7.5.3 数显式显微硬度计 .....	179
6.4.3 数字成像过程的控制 .....	144	7.5.4 半自动硬度测量的显微硬度计 .....	179
6.4.4 数字图像处理高级技术 .....	146	参考文献 .....	180
6.4.5 图像分析系统发展 .....	148	<b>第8章 金相试样的制备</b> .....	181
6.5 金相图像分析中图像处理基本操作技术 .....	149	8.1 金相试样的选取及截取 .....	181
6.5.1 定义标尺 .....	149	8.1.1 金相试样的选取 .....	181
6.5.2 图像清晰处理 .....	150	8.1.2 金相试样的截取 .....	182
6.5.3 图像灰度调整 .....	151	8.2 金相试样的夹持及镶嵌 .....	183
参考文献 .....	152	8.2.1 金相试样的夹持 .....	183
<b>第7章 显微硬度试验及应用</b> .....	153	8.2.2 金相试样的镶嵌 .....	184
7.1 显微维氏(Vickers)硬度试验 .....	153	8.3 金相试样的磨光 .....	186
7.1.1 试验原理及计算公式 .....	153	8.3.1 磨光机理 .....	186
7.1.2 维氏压头及试验法的特点 .....	154	8.3.2 磨光用材料 .....	187
7.1.3 试验方法和注意事项 .....	156	8.3.3 磨光方法 .....	187
7.1.4 试样最小厚度与最大检测力间的关系 .....	156	8.4 金相试样的抛光 .....	189
7.1.5 显微维氏硬度计性能要求及检定系统 .....	159	8.4.1 机械抛光 .....	189
7.1.6 维氏硬度试验测量结果不确定度的评定 .....	161	8.4.2 电解抛光 .....	193
7.1.7 维氏显微硬度试验的应用 .....	161	8.4.3 化学抛光 .....	196
7.1.8 钢铁、有色合金、难熔化合物组成相的显微硬度值 .....	164	8.5 显微组织的显示 .....	197
7.2 努氏(Knoop)硬度试验 .....	166	8.5.1 化学浸蚀 .....	197
7.2.1 试验原理及计算公式 .....	167	8.5.2 电解浸蚀 .....	199
7.2.2 检测方法和注意事项 .....	167	8.5.3 特殊显示方法 .....	199
7.2.3 试样最小厚度与试验力间关系 .....	169	8.6 非钢铁金属的制样及组织显示方法 .....	203
7.2.4 努氏硬度计性能要求 .....	170	8.7 现场金相及金相复型技术 .....	204
7.2.5 努氏硬度试验的应用 .....	171	8.7.1 现场金相制样 .....	205
		8.7.2 金相复型技术 .....	205
		附录:常用金相抛光浸蚀试剂 .....	206
		参考文献 .....	207

第9章 扫描电子显微镜及应用	208	10.1 透射电子显微镜原理	234
9.1 扫描电子显微镜工作基础	208	10.1.1 电子的性质	234
9.1.1 背散射电子	208	10.1.2 电磁透镜	234
9.1.2 二次电子	209	10.1.3 电子显微镜的分辨力	237
9.1.3 透射电子	209	10.1.4 透射电子显微镜的场深和焦深	237
9.1.4 特征 X 射线	209	10.2 透射电子显微镜的构造	238
9.1.5 俄歇电子	210	10.2.1 镜筒	238
9.2 扫描电子显微镜结构及工作原理	210	10.2.2 真空系统	240
9.2.1 扫描电子显微镜结构	210	10.2.3 供电系统	240
9.2.2 扫描电子显微镜各种图像的成像原理	211	10.3 透射电镜的样品制备技术	240
9.3 X 射线波谱仪	214	10.3.1 表面形貌复型及投影技术	240
9.3.1 X 射线波谱仪的结构原理	214	10.3.2 萃取复型	243
9.3.2 X 射线波谱仪的分析方式	216	10.3.3 粉末样品制备方法	244
9.3.3 X 射线波谱定量分析	216	10.3.4 金属薄膜样品制备方法	245
9.4 X 射线能谱仪	218	10.4 复型像分析及应用	247
9.4.1 能谱分析的原理	218	10.4.1 复型图像分析	247
9.4.2 能谱仪的结构	218	10.4.2 金相显微组织形态分析	248
9.4.3 X 射线能谱分析	219	10.4.3 现场检验分析中的应用	249
9.4.4 X 射线波谱和 X 射线能谱分析的特点	219	10.4.4 失效分析中的应用	250
9.5 电子通道效应及电子背散射衍射	221	10.5 电子衍射分析及应用	251
9.5.1 电子通道效应	221	10.5.1 电子衍射原理	251
9.5.2 背散射电子衍射(EBSD)	222	10.5.2 电子显微镜中的电子衍射	253
9.6 新颖扫描电镜简介	223	10.5.3 电子衍射花样分析	253
9.6.1 高分辨场发射扫描电镜	223	10.5.4 电子衍射在金相分析中的应用	256
9.6.2 低电压扫描电镜和低真空扫描电镜	224	10.6 金属薄膜衍衬像及应用	257
9.7 扫描电子显微镜的试样制备方法	224	10.6.1 衍衬成像原理	257
9.7.1 金属断口试样的制备	225	10.6.2 衍衬像分析应用	257
9.7.2 金相试样的制备	225	10.7 分析电子显微镜及应用	260
9.7.3 导电性差和不导电试样制备	226	10.7.1 透射扫描电子显微镜	260
9.7.4 粉末试样的制备	226	10.7.2 薄晶体 X 射线显微分析	260
9.8 典型应用	227	10.7.3 动态分析	260
9.8.1 断裂和断口分析	227	10.7.4 高分辨电子显微分析	261
9.8.2 金相显微组织分析	229	10.7.5 分析电镜应用实例	261
9.8.3 金属及合金表面形貌分析	231	参考文献	262
9.8.4 粉末颗粒的测定和纳米材料的研究	232	第11章 X 射线衍射及在金属分析中的应用	263
9.8.5 晶体取向研究	232	11.1 X 射线衍射的基本原理	263
9.8.6 动态观察	233	11.1.1 晶体结构的基本特点	263
参考文献	233	11.1.2 晶体对 X 射线的衍射	265
第10章 透射电子显微镜及应用	234	11.1.3 X 射线衍射的结构分析	267
		11.2 X 射线衍射仪的构造	267

11.2.1 X射线粉末衍射仪	267	11.4.1 Rietveld全谱线形拟合法的	294
11.2.2 多功能衍射仪	269	基本概念	294
11.3 X射线衍射在金属分析中的一些应用	271	11.4.2 Rietveld全谱线形拟合精修结构	295
应用举例	271	应用举例	295
11.3.1 物相定性分析	271	11.4.3 晶体结构的从头测定	296
11.3.2 宏观(残余)应力的测定	274	11.4.4 全谱线形拟合法在粉末衍射	297
11.3.3 点阵常数的测定	277	传统领域中的应用简介	297
11.3.4 物相定量分析	281	11.5 同步辐射与X射线分析简介	300
11.3.5 织构的测定	283	11.5.1 同步辐射的特性	300
11.3.6 晶体结构的测定	287	11.5.2 同步辐射装置构造简介	301
11.3.7 衍射线形的分析	287	11.5.3 上海光源的X射线分析技术简介	301
11.3.8 表面与薄膜分析	290	参考文献	304
11.4 多晶体衍射全谱线形拟合法与晶体	293		
结构的测定	293		

### 第三篇 金相常规项目检测

第12章 钢铁材料的低倍检验	308	参考文献	332
12.1 钢锭结晶过程及缺陷形成	308	第13章 钢的显微组织常规分析及评定	333
12.2 钢的酸蚀试验方法及缺陷评定	309	13.1 带状组织评定	333
12.2.1 试样的截取及制样	310	13.2 游离渗碳体分布评定	335
12.2.2 热酸蚀试验	311	13.3 魏氏组织评定	337
12.2.3 冷酸蚀试验	312	13.4 碳化物不均匀度评定	339
12.2.4 钢的低倍组织缺陷及评定原则	313	13.4.1 共晶碳化物的不均匀度评定	339
12.3 连铸钢坯凝固组织及内部缺陷的	320	13.4.2 二次共析碳化物偏聚评定	346
评定	320	13.5 碳化物液析评定	348
12.3.1 连铸钢坯凝固组织低倍评定方法	321	13.6 钢材表面脱碳层鉴别与深度测定	350
12.3.2 连铸钢坯低倍组织缺陷评级	322	13.7 球化退火处理及球化级别评定	351
12.4 低倍组织浸蚀方法的应用	323	13.7.1 共析、过共析钢球化退火及评级	351
12.5 断口试验及缺陷鉴别	324	13.7.2 亚共析钢球化退火及评级	353
12.5.1 检验断口的制备	324	13.8 高温使用中(珠光体)球化程度评定	356
12.5.2 检验用断口的分类	325	13.8.1 20号系列钢珠光体球化评级	356
12.5.3 断口形貌及各种缺陷识别	325	(DL/T 674—1999)	356
12.6 钢材塔形发纹检验	329	13.8.2 12Cr1MoV钢球化评级	357
12.6.1 发纹的特征及成因	330	(DL/T 773—2001)	357
12.6.2 塔形发纹检验试样制备	330	13.8.3 15CrMo类钢珠光体球化评级	358
12.6.3 发纹检验方法	330	(DL/T 787—2001)	358
12.7 钢材硫印、磷印试验	331	13.8.4 2.25Cr-1Mo类钢球化评级	359
12.7.1 磷印试验	331	(DL/T 999—2006)	359
12.7.2 硫印试验	332	参考文献	360

第 14 章 钢中非金属夹杂物检测及评级 .....	361	15.1 金属材料晶粒度及晶粒度级别 .....	385
14.1 钢中非金属夹杂物的种类及形态 .....	361	15.1.1 晶粒度的基本概念 .....	385
14.1.1 按夹杂物的化学成分分类 .....	361	15.1.2 几种晶粒度级别的定义 .....	386
14.1.2 按夹杂物的可塑性分类 .....	363	15.2 常用晶粒度级别测定方法 .....	389
14.1.3 按夹杂物的来源分类 .....	363	15.2.1 比较法 .....	389
14.1.4 按夹杂物形态和分布分类 .....	364	15.2.2 面积法 .....	393
14.2 钢中非金属夹杂物的鉴定方法 .....	364	15.2.3 截点法 .....	393
14.2.1 金相分析法 .....	364	15.2.4 测定报告 .....	394
14.2.2 电子探针方法 .....	368	15.3 几种金属材料晶粒度级别的测定 .....	394
14.2.3 电解分离法 .....	368	15.3.1 低碳钢冷轧薄板铁素体晶粒度的测定 .....	394
14.3 钢中非金属夹杂物显微检测评定方法 .....	368	15.3.2 铜及铜合金晶粒度的测定 .....	397
14.3.1 非金属夹杂物显微检测的取样与观察 .....	369	15.3.3 铝及铝合金晶粒度的测定 .....	397
14.3.2 GB/T 10561—2005(ISO 4967:1998) 检测方法 .....	370	15.3.4 高速工具钢晶粒度的测定 .....	402
14.3.3 原 DIN 50 602:1985 检测方法 .....	375	15.4 双重晶粒度的测定方法 .....	402
14.3.4 ASTM E45 - 2011a 检测方法 .....	379	15.4.1 双重晶粒度分布类别 .....	402
14.3.5 BS EN 10247:2007 检测方法 .....	381	15.4.2 双重晶粒度级别的测定方法 .....	403
14.3.6 钢材纯洁度级别检测 .....	383	15.5 晶粒度形成及显示 .....	405
参考文献 .....	384	15.5.1 铁素体钢奥氏体晶粒度的形成与显示 .....	405
第 15 章 金属材料晶粒度测定 .....	385	15.5.2 高速工具钢奥氏体晶粒的显示 .....	407
		15.5.3 常用显示奥氏体晶粒浸蚀剂 .....	407
		参考文献 .....	408

#### 第四篇 常用金属工程材料及金相分析

第 16 章 通用结构钢及金相分析 .....	410	16.2.6 中温等温处理及金相分析 .....	419
16.1 通用结构钢的特性及组成 .....	410	16.2.7 拉拔工艺及金相分析 .....	422
16.1.1 通用结构钢的主要特性及影响因素 .....	410	16.3 非调质机械结构钢及金相分析 .....	422
16.1.2 通用结构钢的成分组成 .....	411	16.3.1 非调质机械结构钢的成分和工艺特点 .....	423
16.1.3 合金元素在结构钢中的作用 .....	412	16.3.2 铁素体-珠光体非调质钢及金相分析 .....	426
16.2 各种工艺条件下调质结构钢金相分析 .....	414	16.3.3 贝氏体型非调质钢 .....	427
16.2.1 轧制处理及金相分析 .....	414	16.3.4 冷作强化非调质钢及金相分析 .....	430
16.2.2 退火处理及金相分析 .....	414	16.4 通用结构钢常见组织缺陷及诊断 .....	430
16.2.3 锻造及金相分析 .....	415	16.4.1 过热及过烧组织 .....	431
16.2.4 淬火-低温回火及金相分析 .....	417	16.4.2 表面脱碳 .....	432
16.2.5 淬火-高温回火(调质)及金相分析 .....	418		

16.4.3 淬火(调质)组织中存在铁素体	433	18.4 高碳铬轴承钢的锻造及组织	472
16.4.4 开裂	434	18.4.1 高碳铬轴承钢的锻造	472
16.4.5 其他缺陷组织	434	18.4.2 锻件的显微组织	473
参考文献	435	18.4.3 锻造缺陷	474
<b>第17章 弹簧钢及金相分析</b>	436	18.5 高碳铬轴承钢热处理及金相组织	475
17.1 弹簧及弹簧钢	436	18.5.1 正火	476
17.1.1 弹簧的分类及主要特性	436	18.5.2 球化退火	476
17.1.2 弹簧钢的性能要求	436	18.5.3 淬火、回火	478
17.1.3 弹簧钢所含合金元素及作用	437	18.5.4 等温淬火回火处理	481
17.2 弹簧钢原材料加工及金相分析	442	18.5.5 深冷处理	482
17.2.1 热轧弹簧钢型材及金相分析	442	18.6 其他轴承钢热处理及金相组织简介	483
17.2.2 冷拉弹簧钢型材及金相分析	442	18.6.1 高温轴承钢的热处理及金相组织	483
17.2.3 预强化弹簧钢丝及金相分析	442	18.6.2 高碳铬不锈钢轴承钢热处理及金相组织	485
17.3 弹簧成型后的热处理及金相分析	444	18.6.3 表面处理轴承钢热处理及金相组织	486
17.3.1 弹簧成型后的基本热处理及金相分析	444	18.7 轴承零件常见失效形式及诊断	486
17.3.2 几种常用弹簧钢的热处理及金相分析	446	18.7.1 轴承零件的磨削烧伤及诊断	486
17.4 弹簧的表面处理	452	18.7.2 轴承零件接触疲劳失效及诊断	487
17.4.1 表面化学保护层	452	参考文献	488
17.4.2 弹簧表面的金属防护层	452	<b>第19章 工具钢及金相分析</b>	489
17.5 弹簧钢的缺陷组织和判别	453	19.1 工具钢分类及基本特性	489
17.5.1 弹簧常见的表面缺陷	453	19.1.1 工具钢分类	489
17.5.2 弹簧钢的显微组织缺陷	454	19.1.2 工具钢基本特性	489
参考文献	456	19.2 碳素工具钢及金相分析	490
<b>第18章 轴承钢及金相分析</b>	457	19.2.1 碳素工具钢的牌号及特点	490
18.1 轴承钢的分类	457	19.2.2 碳素工具钢原材料的金相分析	491
18.1.1 高碳铬轴承钢	459	19.2.3 碳素工具钢热处理及金相分析	493
18.1.2 表面硬化轴承钢	459	19.3 合金工具钢及金相分析	496
18.1.3 高碳铬不锈钢轴承钢	460	19.3.1 合金工具钢牌号及化学成分	496
18.1.4 高温轴承钢	461	19.3.2 合金工具钢原材料的金相分析	496
18.1.5 其他轴承材料	462	19.3.3 合金工具钢热处理及金相分析	498
18.2 高碳铬轴承钢的成分与冶金质量	463	19.4 高速工具钢及金相分析	500
18.2.1 化学成分的控制	463	19.4.1 高速工具钢组成、牌号及分类	500
18.2.2 低倍组织缺陷	464	19.4.2 高速工具钢原材料金相分析	503
18.2.3 原材料微观缺陷的检验	466		
18.3 高碳铬轴承钢在加热和冷却时的组织转变	470		
18.3.1 高碳铬轴承钢在加热过程中的组织转变	470		
18.3.2 高碳铬轴承钢在冷却过程中的组织转变	471		

19.4.3 高速工具钢热处理及金相分析	510	21.1.2 不锈钢的分类	558
19.5 高速工具钢表面改性及金相分析	517	21.1.3 不锈钢牌号的命名	559
19.5.1 蒸汽处理	518	21.2 马氏体不锈钢和耐热钢及金相分析	561
19.5.2 氮化处理	518	21.2.1 马氏体不锈钢和耐热钢的牌号、成分及性能	561
19.5.3 硫氮共渗蒸汽处理的复合处理	519	21.2.2 马氏体不锈钢及耐热钢合金化的特点	562
19.5.4 高速钢的渗氮处理	520	21.2.3 马氏体不锈钢和耐热钢的热处理及金相组织	565
19.5.5 高速钢的PVD镀层	520	21.3 奥氏体不锈钢和耐热钢及金相分析	571
19.6 工具钢的缺陷分析	522	21.3.1 奥氏体不锈钢和耐热钢的牌号、成分及特点	571
19.6.1 原材料缺陷	522	21.3.2 奥氏体不锈钢合金化特点	574
19.6.2 制坯工艺不当造成的缺陷	525	21.3.3 奥氏体不锈钢的热处理	576
19.6.3 热处理不当造成的缺陷	527	21.3.4 奥氏体不锈钢的金相检验	577
19.6.4 其他因素造成的缺陷	530	21.4 铁素体不锈钢和耐热钢及金相分析	582
参考文献	530	21.4.1 铁素体不锈钢和耐热钢的牌号、成分及性能	582
<b>第20章 模具钢及金相分析</b>	531	21.4.2 铁素体不锈钢和耐热钢合金化特点	584
20.1 模具钢分类	531	21.4.3 铁素体不锈钢的热加工及金相组织	585
20.2 冷作模具钢及金相分析	532	21.4.4 铁素体不锈钢的脆化现象	585
20.2.1 冷作模具钢特性及组成	532	21.5 双相不锈钢及金相分析	586
20.2.2 冷作模具钢原材料金相检验	533	21.5.1 双相不锈钢的特点和分类、牌号	586
20.2.3 冷作模具钢的热处理及金相检验	535	21.5.2 双相不锈钢中的合金化特点	588
20.3 热作模具钢及金相分析	540	21.5.3 双相不锈钢的热加工工艺及对组织、性能的影响	588
20.3.1 热作模具钢特性及组成	540	21.5.4 双相不锈钢的组织及金相检验	589
20.3.2 热作模具钢的原材料金相检验	542	21.6 沉淀硬化型不锈钢及金相分析	592
20.3.3 热作模具钢的热处理及金相检验	543	21.6.1 沉淀硬化型不锈钢特点、分类及牌号	592
20.4 塑料模具专用钢及金相分析	550	21.6.2 奥氏体-马氏体沉淀硬化不锈钢强化工艺及组织	593
20.4.1 塑料模具钢的特性及组成	550	21.6.2 马氏体沉淀硬化不锈钢强化工艺及组织	594
20.4.2 预硬型塑料模具专用钢的热处理及金相检验	551	21.7 不锈钢的腐蚀行为	597
20.4.3 时效硬化型塑料模具钢热处理及金相检验	552		
20.5 模具钢的缺陷组织及诊断	554		
20.5.1 组织偏析	554		
20.5.2 碳化物偏析	554		
20.5.3 淬火欠热及过热过烧组织	554		
20.5.4 淬火组织中的贝氏体	555		
参考文献	556		
<b>第21章 不锈钢和耐热钢及金相分析</b>	557		
21.1 不锈钢特性、分类及牌号	557		
21.1.1 不锈钢耐腐蚀原理和合金元素的作用	557		

21.7.1 不锈钢腐蚀行为及分类	597	22.6.4 铸造高温合金及金相组织	636
21.7.2 各类不锈钢的耐腐蚀性能	599	22.7 高温合金的金相分析	637
21.8 不锈钢和耐热钢的样品制备及相鉴别	602	22.7.1 高温合金的金相制样及相鉴别	637
21.8.1 不锈钢和耐热钢金相试样制备	602	22.7.2 变形高温合金的组织评定	642
21.8.2 不锈钢、耐热钢中相的鉴别	605	附录	648
参考文献	606	参考文献	649
<b>第22章 高温合金及金相分析</b>	607	<b>第23章 铸钢及金相分析</b>	650
22.1 高温合金特点、分类及牌号表示方法	607	23.1 铸钢的工艺特点	650
22.1.1 高温合金的主要特性	607	23.1.1 铸钢件的成型及其组织性能特点	650
22.1.2 高温合金的分类	608	23.1.2 铸钢件的常规热处理特点	652
22.1.3 高温合金的牌号表示方法	609	23.2 铸造碳钢及其金相分析	653
22.1.4 英国和美国的高温合金体系	609	23.2.1 铸造碳素钢的牌号和化学成分	653
22.2 高温合金中各元素的特性和作用	610	23.2.2 铸造碳素钢的金相分析	654
22.2.1 基体元素的特性	610	23.3 铸造低合金钢及其金相分析	656
22.2.2 合金元素的作用	611	23.3.1 一般工程与结构用低合金铸钢件	656
22.3 高温合金的强化原理	611	23.3.2 铸造低合金结构钢的金相组织	659
22.3.1 固溶强化	611	23.4 铸造不锈钢及金相分析	663
22.3.2 第二相(时效)强化	612	23.4.1 铸造不锈钢分类、牌号及其化学成分	663
22.3.3 晶界强化	612	23.4.2 铸造马氏体不锈钢	665
22.3.4 工艺强韧化	612	23.4.3 铸造奥氏体不锈钢及金相分析	666
22.4 高温合金常见相及其作用	613	23.4.4 铸造奥氏体铁素体双相不锈钢	670
22.4.1 高温合金中常见析出相及分类	613	23.4.5 铸造马氏体沉淀硬化不锈钢	672
22.4.2 高温合金中几何密排相及其作用	614	23.4.6 铸造不锈钢的腐蚀形式	673
22.4.3 拓扑密排相(TCP)	618	23.5 铸造奥氏体锰钢及其金相分析	673
22.4.4 间隙相	620	23.5.1 铸造奥氏体锰钢的化学成分	674
22.5 高温合金的热处理	624	23.5.2 合金元素在奥氏体锰钢中的作用	674
22.5.1 固溶处理	624	23.5.3 奥氏体锰钢的热处理	676
22.5.2 中间处理	624	23.5.4 奥氏体锰钢的力学性能	677
22.5.3 时效处理	625	23.5.5 铸造奥氏体锰钢的金相分析	677
22.5.4 弯曲晶界热处理	625	23.5.6 铸造奥氏体锰钢的常见缺陷	680
22.5.5 高温合金的退火处理	625	23.6 铸钢的缺陷组织及诊断	682
22.6 高温合金的金相组织	626	23.6.1 铸造热裂纹	682
22.6.1 铁基变形高温合金及金相组织	626	23.6.2 铸造冷裂纹	684
22.6.2 镍基变形高温合金及金相组织	631	23.6.3 缩孔和缩松	684
22.6.3 钴基变形高温合金及金相组织			



23.6.4	气体类缺陷	685	<b>第25章 粉末冶金材料及金相分析</b>	726
23.6.5	夹砂和夹渣	685	25.1 粉末冶金材料概述	726
23.6.6	焊补缺陷	685	25.1.1 粉末冶金材料的分类	726
	参考文献	686	25.1.2 粉末冶金材料的牌号、成分及性能	726
<b>第24章 铸铁及金相分析</b>		687	<b>25.2 粉末冶金制品的工艺特点</b>	732
24.1 铸铁的分类及其牌号	687	25.2.1 金属粉末的制取方法	732	
24.2 铸铁的石墨化过程	688	25.2.2 粉末冶金制品的成形方法	732	
24.2.1 铁-碳合金双重相图和 Fe-C-Si 三元相图	688	25.2.3 粉末冶金制品的固结	734	
24.2.2 铸铁的石墨化过程	689	25.2.4 粉末冶金材料的熔渗和浸渗处理	735	
24.2.3 影响铸铁石墨化的因素	691	25.2.5 硬质合金生产的工艺特点	736	
24.3 灰铸铁及金相分析	692	<b>25.3 铁基粉末冶金制品的热处理</b>	736	
24.3.1 灰铸铁的牌号及性能	692	25.3.1 铁基粉末冶金制品的热处理特点	736	
24.3.2 灰铸铁的石墨评定	694	25.3.2 铁基粉末冶金制品的整体淬火、回火处理	737	
24.3.3 灰铸铁中的组织及分级	698	25.3.3 铁基粉末冶金制品的渗碳及碳氮共渗	737	
24.4 球墨铸铁及金相分析	701	25.3.4 铁基粉末冶金制品的氮碳共渗	737	
24.4.1 球墨铸铁牌号及性能	701	25.3.5 铁基粉末冶金制品的烧结硬化	737	
24.4.2 球状石墨的特性和结构	703	25.3.6 铁基粉末冶金制品的水蒸气处理	738	
24.4.3 球墨铸铁的石墨评级	704	<b>25.4 粉末冶金制品的金相分析</b>	738	
24.4.4 球墨铸铁的组织及分类	705	25.4.1 粉末冶金材料金相制样的特点	738	
24.5 可锻铸铁及金相分析	706	25.4.2 粉末冶金制品中孔隙、石墨及夹杂等检测	741	
24.5.1 可锻铸铁牌号及性能	706	25.4.3 粉末冶金制品的金相组织及评定	743	
24.5.2 可锻铸铁的石墨化机理	707	<b>25.5 硬质合金的金相分析</b>	746	
24.5.3 可锻铸铁的金相检验	708	25.5.1 硬质合金金相制样特点	747	
24.6 蠕墨铸铁及金相分析	710	25.5.2 硬质合金的孔隙及非化合碳(石墨)检测	748	
24.6.1 蠕墨铸铁牌号及其性能	710	25.5.3 硬质合金的金相组织评定	750	
24.6.2 蠕墨铸铁的蠕墨化过程	710	25.5.4 硬质合金的组织缺陷	753	
24.6.3 蠕墨铸铁的金相检验	710	参考文献	754	
24.7 特种铸铁及金相组织	711	<b>第26章 铝、铝合金及金相分析</b>	755	
24.7.1 减摩铸铁及金相组织	712	26.1 铝合金的分类、成分和牌号	755	
24.7.2 抗磨铸铁及金相组织	714	26.1.1 纯铝的特性及牌号	755	
24.7.3 耐热铸铁及金相组织	717	26.1.2 铝合金中主要合金元素及作用		
24.7.4 耐蚀铸铁及金相组织	719			
24.7.5 奥氏体铸铁及金相组织	720			
24.8 铸铁常见缺陷及诊断	720			
24.8.1 由气体引起的缺陷	720			
24.8.2 针孔	722			
24.8.3 缩孔	722			
24.8.4 石墨偏析	723			
24.8.5 组织的不均匀性	724			
24.8.6 夹杂、夹渣	724			
24.8.7 热裂、冷裂	725			
参考文献	725			