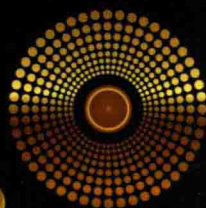


刘子瑜 段莉萍 主编

钢铁及合金 物理检测技术

GANGTIE JI HEJIN
WULI JIANCE JISHU

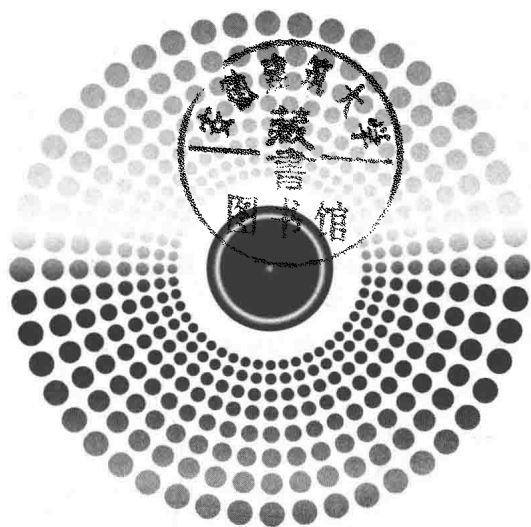


化学工业出版社

刘子瑜 段莉萍 主 编
乔日东 张立君 唐家耘 郭智敏 黄文涛 李德光 副主编

钢铁及合金 物理检测技术

GANGTIE JI HEJIN
WULI JIANCE JISHU



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书内容主要包括钢铁及合金的力学性能检测技术、金相检测技术、X射线衍射技术、电子显微分析技术、物理性能检测技术、无损检测技术,还包括以这些检测技术为基础,结合化学分析和测量技术等综合性的失效分析技术。本书重点介绍了检测方法、所用仪器设备、钢铁及合金材料及其相关产品的检测和失效分析特点,其中既有作者的工作体会和检测分析技巧,又有不少实际检测和分析案例,部分内容是首次公开。本书不仅可以让非专业人员清楚了解钢铁及合金物理检测技术,也可以让准备从事钢铁及合金物理检测的人员更容易入门,并有助于已从业人员的专业技术能力的进一步提升。

本书可作为从事钢铁及合金物理检测技术等技术人员用书,还可作为钢铁及合金物理检测技术领域的大中专学生的学习用书,也可作为本行业从业人员职业技术考试培训用书。

图书在版编目(CIP)数据

钢铁及合金物理检测技术/刘子瑜,段莉萍主编. —北京:
化学工业出版社, 2016. 6
ISBN 978-7-122-26721-4

I. ①钢… II. ①刘…②段… III. ①钢-物理性质-检测②铁-物理性质-检测③合金-物理性质-检测 IV. ①TG142

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 071097 号

责任编辑: 韩庆利
责任校对: 王素芹

文字编辑: 张燕文
装帧设计: 史利平

出版发行: 化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印刷: 北京云浩印刷有限责任公司

装订: 三河市瞰发装订厂

710mm×1000mm 1/16 印张 15¼ 字数 301 千字 2016 年 7 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686)

售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 48.00 元

版权所有 违者必究

《钢铁及合金物理检测技术》

编审委员会

主任：刘子瑜

委员（按姓氏笔画排序）：

丁杰敬	王超伦	田 甜	乔日东	刘子瑜
刘素芬	刘斌恒	孙远东	李 岩	李 鑫
李德光	张 明	张立君	邵玉萍	周宏伟
郝丽萍	段莉萍	郭智敏	唐家耘	唐盛明
黄文涛	崔文超	温铁丽	谢宝奎	

前言

FOREWORD

目前我国正在由制造大国向制造强国转变，实施“质量强国”战略是实现这一转变的必然选择。质量分析、试验、检测服务作为高技术产业类的一项重要内容在国家《产业结构调整指导目录（2011年本）》中被重点提出。钢铁及合金材料是国民经济建设最重要的物质基础之一，加强钢铁材料及其产品的质量控制势在必行。质量控制是为使检测结果具有一定水平的代表性、可靠性和可比性所采取的科学管理方法，钢铁及合金材料的物理检测技术是质量控制工作中重要的组成部分。

本书针对钢铁及合金材料及其产品的物理检测技术，打破常规的物理检测范畴，内容涵盖了金相检测、电子光学检测、物理性能检测、力学性能检测、无损检测，还包括了综合运用上述检测方法的失效分析技术。本书结合作者的实际工作经验深入浅出地讲述了检测方法、检测仪器设备，分析了钢铁材料和相关产品的检测特点。书中不乏作者的工作体会和检测分析技巧，不少内容是首次公开，例如通用设备的工装辅具、部分工业CT应用实例、部分金相组织和微观组织照片等。本书着重于钢铁及合金物理检测技术知识的归纳和总结，意在使准备步入和已在该行业工作的检测人员对钢铁及合金物理检测技术有一个更宏观、更直接的认识和了解，以便更好地进行工作和研究。

本书可作为从事钢铁及合金物理检测技术等技术人员用书，还可作为钢铁及合金物理检测技术领域的大中专学生的学习用书，也可作为本行业从业人员职业技术考试培训用书。

由于编者水平所限，书中疏漏和不妥之处在所难免，敬请各位同行专家和广大读者批评指正，以便不断完善。

编者

目录

CONTENTS

第一章 钢铁及合金基础知识

1

第一节 钢铁及合金的分类和编号	1
一、分类	1
二、编号	2
三、钢铁及合金牌号统一数字代号体系	5
第二节 金属学	5
一、金属和金属键	5
二、晶体结构	5
三、配位数和致密度	7
四、晶体缺陷	7
五、合金的相	7
第三节 热处理	8
一、退火	8
二、正火	9
三、淬火	10
四、回火	11
第四节 铁碳相图	12
一、相图中的点、线、区的意义	12
二、包晶转变(水平线 HJB)	13
三、共晶反应(水平线 ECF)	13
四、共析转变(水平线 PSK)	14
五、固态转变线	14

第二章 力学性能试验

15

第一节 拉伸试验	15
----------------	----

一、概述	15
二、拉伸的基本原理	15
三、拉伸试验方法	16
第二节 硬度试验	18
一、概述	18
二、布氏硬度试验	19
三、洛氏硬度试验	23
四、维氏硬度试验	25
五、里氏硬度试验	29
第三节 冲击试验	33
一、概述	33
二、夏比摆锤冲击试验原理及定义	33
三、冲击试验设备	34
四、试样要求	35
五、试验程序	35
第四节 压缩试验	36
一、概述	36
二、压缩设备	36
三、压缩试验方法	36
四、压缩试样	36
五、试验原理	37
六、试验程序	38
第五节 弯曲试验	39
一、基本原理	39
二、弯曲设备	39
三、弯曲试验方法	39
第六节 蠕变试验	40
一、基本原理	40
二、定义和计算公式	41
三、蠕变试验设备	41
四、蠕变试验方法	41
五、试验程序	41
第七节 疲劳试验	42
一、概述	42
二、疲劳试验设备	43
三、疲劳试验方法	44
四、试样的制备	44

五、 试验步骤	45
六、 试验结果处理	46
第八节 磨损试验	46
一、 概述	46
二、 定义与计算公式	46
三、 磨损试验设备	47
四、 磨损试验方法	48
五、 试验程序	48
第九节 扭转试验	49
一、 概述	49
二、 基本原理	49
三、 试验设备	49
四、 试验方法	49
五、 试样	49
六、 试验步骤	50
七、 扭转试验机检测能力的拓展	50
第十节 通用设备的工装辅具	51
一、 特殊样品维氏硬度工装	51
二、 汽车零部件检测工装	51
三、 螺栓抗拉强度检测工装	51

第三章

金相检验技术

53

第一节 金相检验基础知识	53
一、 金相检验设备	53
二、 金相试样制备	55
第二节 钢的宏观检验技术	57
一、 断口检验	57
二、 硫印试验	59
三、 酸蚀试验	60
四、 塔形试验	60
第三节 钢的微观检验方法	63
一、 钢中非金属夹杂物评定方法	63
二、 金属平均晶粒度测定方法	67
三、 钢的脱碳层深度测定方法	69
四、 钢的渗层深度测定和金相组织评定方法	70
五、 钢的共晶碳化物不均匀度评定方法	73

六、钢的显微组织评定方法	74
七、钢质模锻件金相组织评定方法	75
第四节 常用钢铁及合金及其检验	76
一、结构钢的检验	77
二、工具钢的检验	79
三、铸铁的检验	81
四、特殊用途钢的检验	84
五、高温合金的检验	86

第四章 X射线衍射技术

87

第一节 概述	87
一、X射线的产生	87
二、X射线衍射	88
三、X射线散射	89
四、X射线强度	89
第二节 常用X射线衍射技术	89
一、晶体点阵常数测定	90
二、物相分析	91
三、宏观应力的测定	92
四、织构测定	94
五、荧光分析	95

第五章 电子显微分析技术

98

第一节 电子显微分析基础知识	98
一、电子与固体物质的作用	98
二、显微镜的分辨率	100
三、电子显微镜成像原理	100
四、电子显微镜的特征	101
第二节 扫描电镜分析技术	104
一、扫描电镜的结构原理	104
二、扫描电镜的主要性能	106
三、样品制备	107
四、断口分析	108
五、表面成分分析	110
六、电子背散射衍射分析	111

第三节 透射电镜分析技术	112
一、透射电镜的结构原理	113
二、透射电镜的主要性能	115
三、透射电镜样品制备技术	116
四、材料晶体缺陷分析	118
五、相分析	119
第四节 电子探针分析技术	121
一、电子探针的结构原理	122
二、电子探针的主要性能	122
三、微区成分分析	123
第五节 俄歇电子能谱分析技术	124
一、俄歇电子能谱仪的结构原理	124
二、俄歇电子能谱仪的主要性能	125
三、表面或界面成分分析	126

第六章

常用物理性能检验

127

第一节 热性能	127
一、热容	127
二、热膨胀	129
三、热传导	131
第二节 电和磁性能	136
一、电阻和电阻率	136
二、磁导率和磁滞回线	139

第七章

无损检测技术

144

第一节 超声波检测	145
一、概述	145
二、超声波检测物理基础	145
三、超声波检测设备	148
四、纵波检测法	150
五、横波检测法	152
六、超声波检测新技术	153
第二节 射线检测	155
一、概述	155
二、射线检测物理基础	156

三、射线检测设备与器材	158
四、射线照相检测方法	160
五、数字射线检测技术	162
第三节 磁粉检测	164
一、概述	164
二、磁粉检测物理基础	165
三、磁粉检测设备与器材	168
四、磁化方法	171
五、磁粉检测的应用	173
第四节 渗透检测	174
一、概述	174
二、渗透检测物理化学基础	174
三、渗透检测设备与器材	177
四、渗透检测工艺操作	180
五、渗透检测方法及应用	181
第五节 涡流检测	182
一、概述	182
二、涡流检测物理基础	183
三、涡流检测设备与器材	188
四、涡流检测的基本技术	189
第六节 工业 CT 检测	190
一、概述	190
二、工业 CT 检测物理基础	192
三、工业 CT 设备	194
四、工业 CT 缺陷检测	196
五、工业 CT 结构检测及尺寸测量	199
六、工业 CT 逆向设计	200
七、工业 CT 密度测量	201
第七节 非常规无损检测	201
一、声发射检测技术	201
二、泄漏检测技术	202
三、激光全息照相检测技术	202
四、目视检测技术	203

第八章 失效分析

204

第一节 概述	204
一、失效分析的几个定义	204

二、失效分析的一般程序	205
三、失效模式分析	206
四、失效原因分析	206
五、失效分析所涉及的检测技术	207
六、失效分析需要具备的条件	209
七、失效分析的作用	210
第二节 断裂失效分析	212
一、概述	212
二、裂纹失效分析	216
三、断裂失效分析	217
四、案例	222
第三节 腐蚀失效分析	224
一、概述	224
二、几种常见的腐蚀失效分析	225
三、案例	227
第四节 磨损失效分析	229
一、概述	229
二、几种常见的磨损失效分析	229
三、案例	230

第一章

钢铁及合金基础知识

第一节 钢铁及合金的分类和编号

一、分类

1. 钢的分类

(1) 按用途分 可分为结构钢、工具钢、特殊性能钢。

① 结构钢 按成分可分为碳素结构钢和合金结构钢两类；按工艺可分为冷变形钢、易切削钢、调质钢、非调质钢、高强度马氏体钢、贝氏体钢、双相钢、弹簧钢、轴承钢等。

② 工具钢 按用途可分为刀具用钢、模具用钢和量具用钢；按化学成分可分为碳素工具钢、合金工具钢和高速工具钢。模具钢按工作状态又可分为冷作模具钢、热作模具钢和塑料模具钢。

③ 特殊性能钢 可分为不锈钢、耐热钢、耐磨钢、磁钢等。不锈钢按组织可分为马氏体不锈钢[1Cr13、3Cr13、9Cr18、1Cr17Ni2、9Cr18MoV 等 (Cr 低 C 高)]、铁素体不锈钢[0Cr13、1Cr17、1Cr28、1Cr17Ti、1Cr25Ti 等 (Cr 高 C 低)]、奥氏体不锈钢 (0Cr18Ni9、1Cr18Ni9、1Cr18Ni9Ti 等)、双相不锈钢 (0Cr21Ni5Mo2Ti、00Cr25Ni5Mn 等) 和沉淀硬化不锈钢 (17-7PH、17-4PH、PH15-7Mo 等) 耐热钢按性能可分为抗氧化钢和热强钢；按组织可分为铁素体耐热钢 (0Cr13Al、1Cr17、2Cr25N 等)、珠光体铁素体耐热钢 (15CrMo、12Cr1MoV、12Cr2MoWVB、17CrMo1V 等)、马氏体耐热钢 (1Cr13、1Cr11MoV、1Cr12WMoV、2Cr12NiMoWV、4Cr9、4Cr10Si2Mo 等)、奥氏体耐热钢 (0Cr19Ni9、1Cr18Ni9Ti、4Cr14Ni14W2Mo、5Cr21Mn9Ni4N、2Cr25Ni20 等)。

(2) 按化学成分分 可分为碳素钢和合金钢。碳素钢又可分为低碳钢 ($w_C \leq 0.25\%$)、中碳钢 ($0.25\% < w_C \leq 0.6\%$)、高碳钢 ($w_C > 0.6\%$)。合金钢又可分为低合金钢 (合金元素含量 $w \leq 5\%$)、中合金钢 (合金元素含量 $5\% < w \leq 10\%$)、高合金钢 (合金元素含量 $w > 10\%$)。GB/T 13304—91 中分为非合金钢、低合金钢、合金钢三类。

(3) 按显微组织分

① 根据平衡态或退火组织分为亚共析钢、共析钢、过共析钢和莱氏体钢。

② 根据正火组织分为珠光体钢、贝氏体钢、马氏体钢和奥氏体钢。

③ 根据室温组织分为铁素体钢、奥氏体钢、马氏体钢和双相钢。

(4) 按品级 (主要是依据钢中 P、S 等有害元素的含量) 分 可分为普通钢、优质钢、高级优质钢和特级优质钢。

2. 铸铁的分类

按照碳的存在形式可分为白口铸铁 (渗碳体形式)、灰口铸铁 (石墨形式)、麻口铸铁 (两种形式都有)。在实际运用中最常用的是灰口铸铁, 根据石墨的形态又可分为灰铸铁、可锻铸铁、球墨铸铁和蠕墨铸铁。

3. 合金的分类

根据组成元素的数目可分为二元合金、三元合金和多元合金; 根据结构可分为混合物合金 (共熔混合物)、固溶体合金、金属互化物合金。高温合金按成分可分为铁基、镍基、钴基, 还有铬基、钼基等; 按基本成形方式分为变形高温合金、铸造高温合金、焊接用高温合金、粉末冶金高温合金和弥散强化高温合金。

二、 编号

1. 钢的编号

我国的钢材编号采用国际化学符号、汉语拼音字母和阿拉伯数字并用的原则。稀土元素含量不多但种类却不少, 因此用 RE 表示其总含量。产品名称、用途、冶炼和浇注方法等, 采用汉语拼音字母表示。采用汉语拼音字母, 原则上只取一个, 一般不超过两个。

(1) 普通碳素结构钢

① 由 Q+数字+质量等级符号+脱氧方法符号组成。它的钢号冠以 Q, 代表钢材的屈服点, 后面的数字表示屈服点数值, 单位是 MPa。例如, Q235 表示屈服点为 235MPa 的碳素结构钢。

② 必要时钢号后面可标出表示质量等级和脱氧方法的符号。质量等级符号分别为 A、B、C、D。脱氧方法符号: F 表示沸腾钢; b 表示半镇静钢; Z 表示镇静钢; TZ 表示特殊镇静钢, 镇静钢可不标符号, 即 Z 和 TZ 都可不标。例如, Q235-AF 表示 A 级沸腾钢。

③ 专门用途的碳素钢, 如桥梁钢、船用钢等, 基本上采用碳素结构钢的表示方法, 但在钢号最后附加表示用途的字母。

(2) 优质碳素结构钢

① 钢号开头的两位数字表示钢的碳含量, 以平均碳含量的万分之几表示。例如, 平均碳含量为 0.45% 的钢, 钢号为 45, 它不是顺序号, 所以不能读成 45 号钢。

② 锰含量较高的优质碳素结构钢, 应将锰元素标出, 如 50Mn。

③ 沸腾钢、半镇静钢及专门用途的优质碳素结构钢应在钢号最后特别标出, 如平均碳含量为 0.1% 的半镇静钢, 其钢号为 10b。

(3) 碳素工具钢

① 钢号冠以 T, 以免与其他钢类相混。

② 钢号中的数字表示碳含量, 以平均碳含量的千分之几表示。例如, T8 表示平均碳含量为 0.8%。

③ 锰含量较高者, 在钢号最后标出 Mn, 如 T8Mn。

④ 高级优质碳素工具钢的磷、硫含量, 比一般优质碳素工具钢低, 在钢号最后加注字母 A, 以示区别, 如 T8MnA。

(4) 合金结构钢

① 钢号开头的两位数字表示钢的碳含量, 以平均碳含量的万分之几表示, 如 40Cr。

② 钢中主要合金元素, 除个别微合金元素外, 一般以百分之几表示。当平均合金含量 $<1.5\%$ 时, 钢号中一般只标出元素符号, 而不标明含量, 但在特殊情况下易导致混淆者, 在元素符号后也可标以数字 1, 如钢号 12CrMoV 和 12Cr1MoV, 前者铬含量为 $0.4\% \sim 0.6\%$, 后者为 $0.9\% \sim 1.2\%$, 其余成分全部相同。当合金元素平均含量 $\geq 1.5\%$ 、 $\geq 2.5\%$ 、 $\geq 3.5\%$ 等时, 在元素符号后面应标明含量, 可相应表示为 2、3、4 等, 如 18Cr2Ni4WA。

③ 钢中的钒 V、钛 Ti、铝 Al、硼 B、稀土 RE 等合金元素, 均属微合金元素, 虽然含量很低, 仍应在钢号中标出。例如, 20MnVB 中钒含量为 $0.07\% \sim 0.12\%$, 硼含量为 $0.001\% \sim 0.005\%$ 。

④ 高级优质钢应在钢号最后加 A, 以区别于优质钢。

⑤ 专门用途的合金结构钢, 钢号冠以 (或后缀) 代表该钢种用途的符号。例如铆螺专用钢 30CrMnSi, 钢号表示为 ML30CrMnSi。

(5) 合金工具钢和高速工具钢

① 合金工具钢钢号的平均碳含量 $\geq 1.0\%$ 时, 不标出碳含量, 当平均碳含量 $<1.0\%$ 时, 以千分之几表示, 如 Cr12、CrWMn、9SiCr、3Cr2W8V。

② 钢中合金元素含量的表示方法, 基本上与合金结构钢相同。但对铬含量较低的合金工具钢钢号, 其铬含量以千分之几表示, 并在表示含量的数字前加 0, 以便把它和一般元素含量按百分之几表示的方法区别开来, 如 Cr06。

③ 高速工具钢的钢号一般不标出碳含量, 只标出各种合金元素平均含量的百分之几。例如, 钨系高速钢的钢号表示为 W18Cr4V。钢号冠以字母 C 者, 表示其碳含量高于未冠 C 的通用钢号。

(6) 滚动轴承钢

① 钢号冠以字母 G, 表示滚动轴承钢。

② 高碳铬轴承钢钢号的碳含量不标出, 铬含量以千分之几表示, 如 GCr15。渗碳轴承钢的钢号表示方法, 基本上和合金结构钢相同。

(7) 不锈钢和耐热钢

① 钢号中碳含量以千分之几表示。例如, 2Cr13 的平均碳含量为 0.2%。钢中碳含量 $\leq 0.03\%$ 或 $\leq 0.08\%$ 者, 钢号前分别加 00 及 0, 如 00Cr17Ni14Mo2、0Cr18Ni9 等。

② 对钢中主要合金元素以百分之几表示, 而钛、铌、锆、氮等则按上述合金结构钢对微合金元素的表示方法标出。

(8) 易切削钢

① 钢号冠以 Y, 以区别于优质碳素结构钢。

② 字母 Y 后的数字表示碳含量, 以平均碳含量的万分之几表示。例如, 平均碳含量为 0.3% 的易切削钢, 其钢号为 Y30。

③ 锰含量较高者, 也在钢号后标出 Mn, 如 Y40Mn。

(9) 弹簧钢 按化学成分可分为碳素弹簧钢和合金弹簧钢两类, 其钢号表示方法, 前者基本上与优质碳素结构钢相同, 后者基本上与合金结构钢相同。

2. 铸铁的编号

铸铁的牌号表示方法参见 GB/T 5612—2008《铸铁牌号表示方法》。铸铁基本代号由表示该铸铁特征的汉语拼音的第一个大写字母组成, 当两种铸铁名称的代号字母相同时, 可在该大写字母后加小写字母来区别。当要表示铸铁组织特征或特殊性能时, 代表铸铁组织特征或特殊性能的汉语拼音的第一个大写字母排列在基本代号的后面, 如 HT 代表灰铸铁, HTS 代表耐蚀灰铸铁。

以化学成分表示铸铁牌号时, 合金元素符号及名义含量排在铸铁代号之后, 按元素含量递减次序排列。常规元素 (碳、硅、锰、硫、磷) 只在有特殊作用时才标注, 合金元素名义含量数值修约按 GB/T 8170 执行, 如 HTSSi15Cr4RE。

以力学性能表示铸铁牌号时, 力学性能值排在铸铁代号及合金元素符号之后, 与合金元素符号和含量之间用“-”隔开。力学性能第一组数字表示抗拉强度 (MPa), 第二组数字表示伸长率 (%), 两组数字间用“-”隔开, 如 QT 400-18。也有只用抗拉强度一组数字表示的。

3. 高温合金的编号

采用字母前缀和阿拉伯数字的表示方法。变形高温合金用 GH 表示, 等轴晶铸造高温合金用 K 表示, 定向凝固柱晶高温合金用 DZ 表示, 单晶高温合金用 DD 表示, 焊接用高温合金丝用 HGH 表示, 粉末冶金高温合金用 FGH 表示, 弥散强化高温合金用 MGH 表示, 金属间化合物高温材料用 JG 表示。

阿拉伯数字的表示方法分为两类。变形高温合金和焊接用高温合金丝牌号中有四位阿拉伯数字, 第一位表示合金的分类号, 第二位至第四位表示合金的编号, 不足三位的合金编号用数字 0 补齐, 0 放在第一位表示分类号的数字与合金编号之间。铸造高温合金一般用三位阿拉伯数字表示, 其余类型高温合金和金属间化合物

高温材料用四位阿拉伯数字表示。详细编号参照 GB/T 14992—2005《高温合金及金属间化合物高温材料的分类和牌号》。

三、钢铁及合金牌号统一数字代号体系

2014年9月1日中国国家标准化管理委员会发布了 GB/T 17616—2013《钢铁及合金牌号统一数字代号体系》，与现行 GB/T 221—2000《钢铁产品牌号表示方法》并用。其中统一数字代号由固定的六位符号组成，左边首位用大写的拉丁字母作前缀，后接五位阿拉伯数字，字母和数字之间应无间隙排列。统一数字代号的结构形式如下：



钢铁及合金的分类和编组主要按其基本成分、特性和用途，同时兼顾我国现有的习惯。详细编号规则见标准。例如，GCr15 和 HT100 按照该标准统一数字代号分别为 B00150 和 C00100。

第二节 金属学

一、金属和金属键

通常人们所说的金属是具有良好的导电性、导热性、延展性（塑性）和金属光泽的物质。而对于金属比较严格的定义是：金属是具有正的电阻温度系数的物质，而所有的非金属的电阻都随着温度的升高而下降，其电阻温度系数为负值。

金属原子之间的连接通过金属键实现。根据近代物理和化学的观点，金属键是指处于聚集状态的金属原子，全部或大部分将它们的价电子贡献出来，这些价电子在所有原子核周围按量子力学规律运动着，即电子云，贡献出价电子的原子，则变成了正离子，沉浸在电子云中，它们依靠运动于其间的公有化的自由电子的静电作用而结合起来。

二、晶体结构

自然界中的晶体有成千上万种，它们的晶体结构各不相同，但若根据晶胞的三个晶格常数和三个轴间夹角的相互关系，则晶体结构可分为 7 大晶系、14 种空间点阵（关于晶胞及 7 大晶系、14 种空间点阵的相关知识可参考《材料科学基础》）。

最常见的晶体结构有三种，即体心立方结构、面心立方结构和密排六方结构。前两者属于立方晶系，后一种属于六方晶系。