

金属材料科学与工程基础

● [日] 德田昌則 总监修
冈本篤樹 津田哲明 片桐望 著
孟昭 译著



冶金工业出版社
www.cnmip.com.cn

金属材料工程基础

[日] 徳田昌則 总监修
岡本篤樹 津田哲明 片桐望 著
孟 昭 译著

北 京

冶 金 工 业 出 版 社

2017

北京市版权局著作权合同登记号 图字：01-2017-3943

構造、状態、磁性、資源からわかる金属の科学，「発行所」株式会社ナツメ社，
ISBN 978-4-8163-5159-4。

内 容 提 要

本书在日本专业畅销书《金属の科学》基础上译著而成，是介绍金属材料相关知识和应用的专业基础丛书。全书共分9章，第1章简要介绍了金属材料的分类和如何获得金属材料以及资源等内容，第2章介绍了金属学的基本知识，第3章介绍了金属变形与组织控制原理及方法，第4章介绍了结构材料和强度材料，第5章介绍了金属功能材料，第6章介绍了金属表面化学的相关知识，第7章介绍了各种各样的金属元素，第8章介绍了我们身边所使用或见到的金属材料，第9章对金属的社会学相关内容进行了简要介绍。本书作者均为日本材料工程界的著名学者及专家，在撰写过程中贯彻理论与实际相结合的原则，利用通俗易懂的语言和丰富精彩的插图将金属材料的相关知识和工程应用展现给广大读者，是一本不可多得的专业基础丛书。

本书可作为材料科学与工程专业、机械专业等相关专业本科和研究生的教材或教学参考书，也可供从事材料、化工、冶金、机械等行业相关从业人员的专业参考书使用。

图书在版编目(CIP)数据

金属材料科学与工程基础/(日) 德田昌则总监修；孟昭译著.
—北京：冶金工业出版社，2017.7

ISBN 978-7-5024-7472-0

I. ①金… II. ①德… ②孟… III. ①金属材料 IV. ①TG14

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 111374 号

出版人 谭学余

地址 北京市东城区嵩祝院北巷39号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjcbbs@cnmp.com.cn

责任编辑 夏小雪 李臻 美术编辑 吕欣童 版式设计 孙跃红

责任校对 石静 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-7472-0

冶金工业出版社出版发行；各地新华书店经销；固安华明印业有限公司印刷

2017年7月第1版，2017年7月第1次印刷

169mm×239mm；18.5印张；1插页；357千字；271页

76.00元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街46号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs.tmall.com

(本书如有印装质量问题，本社营销中心负责退换)

前 言

中国早已成为了世界产品的制造大国。现在中国的工厂数量比世界上任何其他国家都要多。而作为产品物质基础的金属材料，对它的理解就成为必不可少的知识。

在我们的日常生活中，食物、金属、塑料、纤维和纸张等构成了形形色色的日用品、电话、汽车以及各种各样的机械产品，而其中的金属制品在量上来说占据了很大部分。因此有关金属材料的知识对我们来说就显得非常重要。而更为重要的一点就是，现实中生产上述产品的所有机械装置都是由金属材料制成的。因此可以说，金属材料是现代社会的物质基础。

日本版《金属的科学》初版印刷发行于2005年，当时日本正处于世界生产技术水平的巅峰时期。本书的目的就是为维持日本制造业大国地位，面向学生与年轻技师而撰写的添加了大量通俗易懂图解的专业基础书籍。但读者调查结果发现，除了工厂集中度较高地域的购买量较高，购买人群主要为理工科的学生及相关技术人员外，令我们感到意外的是，公司的销售人员和管理人员的购买量也很高。也就是说，对于金属材料的深刻理解不仅仅直接受到了技术人员的关心，也同时得到了间接从事材料工作的其他人员的极大关注。因此，本书在更为详细地阐述了金属材料实用性能中最重要的如材料强度和加工性能等方面内容的同时，还增加了金属材料的使用环境评价、电化学基础理论与应用以及在人类社会中所处的位置等相关内容。

人类社会已经进入了利用人工智能加速技术革新和社会变革的时

代，而中国正以远超世界的速度如超级计算机的研发等来适应这个时代变化。如何利用人工智能是人类面临的一个巨大课题。在物质生产的技术领域，也就是在我们每天的工作现场，则需要具有更高度的发现问题和解决问题的能力，我们称之为“现场力”。而高度的“现场力”则需要更为广泛的金属材料理论和应用基础知识。本书就是以加强以上这些知识为目的而编写的。

最后，为了能让中国读者尽快阅读到本书，理解材料技术的博大精深，孟昭先生对该书的译著、策划等倾注了极大的热情与努力。该书能在短时间内在中国顺利出版，我们对孟昭先生表示由衷的敬意和感谢。

我们衷心希望该书能受到中国广大读者的欢迎。希望通过对金属材料更为广泛和深入的理解，能为中国工业制造技术的不断进步做出贡献。

原著作者代表 **德田昌则**

写在《金属の科学》中文版出版之时

まえがき

中国は、様々な製品を世界に供給するもの作り大国になって久しい。今や、中国国内には、それらの製品を製造するもの作りの現場がどこの国々よりも厚く集積していることになる。そこでは、もの作りの基盤物質としての、金属に関する理解が欠かせない。

我々の日常生活は、食料品や金属、プラスチック、繊維や紙などから構成される様々な日用品、スマホや自動車あるいは産業機械類など多様な製品群に支えられている。その中で、金属製品は量的に大きな割合を占めており、その製造に関わる知識は重要である。それに加えて、もっと重要なことは、金属が、全てのもの作りを実現する機械装置類の殆どを構成しているという点で、現代社会は、金属に大きく依存していると言っても過言ではない。

本書の先代になる「金属の科学」が出版されたのは、2005年で、日本では、もの作り技術が世界トップの座を維持していた時期であった。その維持に貢献すべく、学生や若手技術者向けに図を入れて分かりやすく解説するという工夫をした。所が、実際に、どういう人達に読まれているかを調査した結果は、意外なものであった。まず、もの作り現場の集積度の高い地域での購入が群を抜いていることは理解できたが、購読者には、学生を含む技術系は勿論いたが、我々が予想していなかった営業系や事務系などの寄与が極めて大きいという事が分かった。つまり、金属に関する理解を深めるという事は、ひとり、もの作りに直接関わる技術者だけではなく、もの作りに間接的に関わる、営業系或いは事務系を含む、様々な人達の強い関心事でもあり、それに応え得る著作が求められていた事になる。そして、本書

の原著では、金属の実用面で特に重要な、強度や加工性に関して掘り下げると同時に、金属の使用環境での評価に関して、電気化学的立場から、基礎から応用に渡って総括的に取り上げ、さらに、社会の中での位置づけに関しても整理を試みている。

一方、時代は今や、人工知能の活用による技術革新と社会のあり方の変革までもが加速されるという状況に突入しつつある。しかも、中国では、世界の水準を遙かに超える勢いで、スパコン開発に取り組むなど、それに対応しようとしている。そこでは、人工知能をどのように導入するかが、大きな課題になって来ている。もの作りの世界でも、例外ではない。ここでは、現場力、つまり日々の取組みの現場で発生する問題の発見とそれらを解決して行く解析能力の一層の強化が求められ、基盤となる幅広い基礎と応用の情報蓄積が欠かせない。本書は、まさにそのような基盤強化への貢献を意図している。

最後に、この本の意義を深く理解され、中国の方々に広く読んでいただくために、中国語での出版を企画され、素晴らしい情熱と集中力とで、自ら、その膨大な作業量と時間を伴う翻訳に取り組むばかりでなく、煩雑な交渉業務等をもこなし、短期間で出版にこぎ着けて下さった孟昭先生に対して、心からの敬意と謝意を捧げたいと思います。

この本が、広く中国の読者に受け入れられ、金属に関する幅広い理解を通して、中国でのもの作り技術の発展に貢献することを祈ります。

原著者を代表して **徳田昌則**
中国語での「金属の科学」出版に当たって

作者简介

徳田 昌則 (Tokuda, Masanori)

总监修/执笔：第1章、第7章1节

1938年出生。1965年东京大学大学院博士课程毕业。工学博士。2001年东北大学退休、东北大学名誉教授。2004年至日本大学评价机构教授。

主攻方向：金属冶炼、环境工学。

主要著作（合著）「我が国における純酸素転炉製鋼法の歴史」（日本鉄鋼協会）、「廃棄物の溶融技術」（エヌ・ディー・エヌ）、「金属の科学」（ナツメ社）等。近10年，成立（株）共生医学研究所，积极探索癌症免疫细胞疗法的普及。成立（株）共生资源研究所，主要从事推进有机废弃物的资源化和能源化事业。

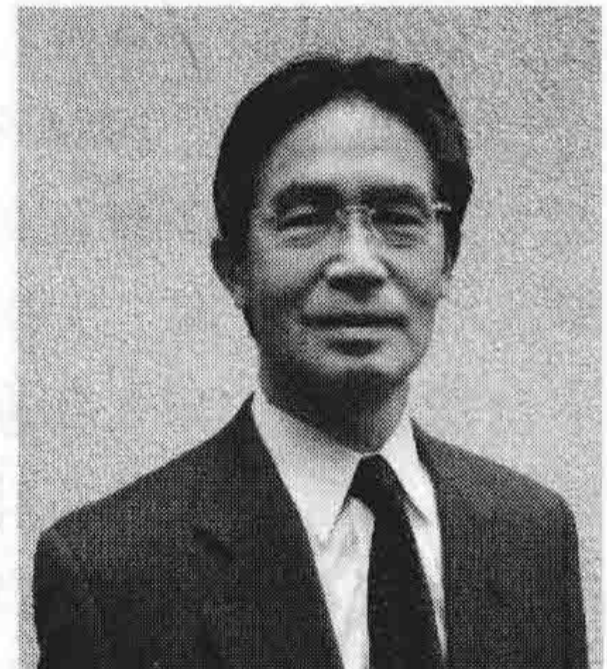


岡本 篤樹 (Okamoto, Atsuki)

执笔：第2~5章

1948年出生。1970年东京大学冶金学科毕业。

在住友金属工业从事29年的薄钢板研究与开发工作。在此期间，1984年由于轿车用薄钢板的开发获得工学博士学位。1999年在住友特殊金属开展磁性材料和电子材料的研究与开发工作，同时担任神户大学客座教授，粉体粉末冶金协会理事等。2005年开始担任日立金属特殊钢的生产技术指导。2009年开始担任东京大学大学院材料工学客座教授。现为技术顾问 M-LABNET 代表。



津田 哲明 (Tsuda, Tetsuaki)

执笔：第6章、第9章8~11节

1947年出生。1971年东京大学工学部冶金学科馆研究室本科毕业。1981年美国 California 大学 Berkeley 化学工学科 Tobias 研究室硕士毕业。1995年锌-铁族合金电镀研究获得工学博士。在住友金属工业（株）从事表面处理钢板的研究、开发、制造、设备设计、品质管理、售后服务、海外销售技术指导等工作 24

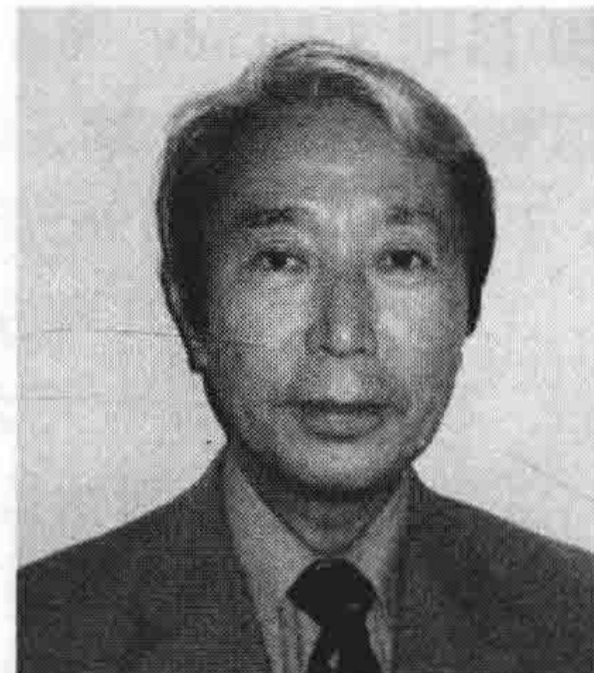


年。其间从事钢铁业无国界纷争年代时的知识产权相关工作 12 年。2007 年退休后，担任日本知识产权协会人才培育 PJ 顾问、产业技术短期大学知识产权教授、日本机械学会法工学会知识产权研究会委员。

片桐 望 (Katagiri, Nozomu)

执笔：第 7 章、第 8 章、第 9 章 1~7 节

1945 年出生。东京大学工学部冶金学科硕士毕业。在 (株) 神户制钢所从事以制钢精炼研究开发和以铁制品为中心的研究策划工作。1981 年因「LD 転炉の制御モデルに関する研究」获得工学博士学位。其后，转至神鋼リサーチ (株) 主要从事环境与材料相关的调查与研究。曾担任エコビランジャパン 社長、中央青山監査法人エコビラン事業部長、横浜国立大学产学联盟协调员、(独) 物質・材料研究机构的特别研究员。现为材料・资源顾问。



孟昭

编译：全书和本书中独自追加的楷体文字内容。

1963 年出生，1984 年西安交通大学机械系金相专业学士学位毕业，1987 年同校材料学院硕士毕业。陕西机械学院 (现西安理工大学) 工作两年后，于 1991 年赴日本自费留学。1996 年获得日本国立熊本大学工学博士学位。其后在 (财) 化学及血清疗法研究所从事生物制品生产与管理 10 年。2006 年回国，2009 年进入西安科技大学。现从事金属材料的教学及纳米工程材料、纳米减摩涂料、工业固体废弃物的再利用和剩余污泥处理等技术方面的研究与开发。目前为西安科技大学材料科学与工程学院副教授。



目 录

1 为了健康和可持续发展的地球	1
1.1 支撑人类社会不断发展和进步的金属材料	1
1.1.1 支撑人类物质社会基础的材料	1
1.1.2 赋予各种形状并维持其形状的结构材料	2
1.1.3 挖掘金属的独特个性, 利用其独特功能制备各种功能材料	2
1.2 获得金属的基本原理	3
1.2.1 利用化学变化, 不稳定状态是其化学变化的根源	3
1.2.2 地壳中各种矿物及基本组成	5
1.2.3 金属冶炼方法	5
1.3 维持现代文明社会存在和发展的金属材料	6
1.3.1 金属资源有限性指标	6
1.3.2 提供使用可靠性和持续性的维护保养	12
小知识	13
2 金属学基本知识	14
2.1 原子论和热力学的发展	14
2.1.1 从道尔顿的原子量表到元素周期表	14
2.1.2 对原子结构的理解和热力学的发展	14
2.2 化学元素周期表和金属元素	15
2.2.1 原子的基本构造	15
2.2.2 典型元素和过渡元素——金属与非金属	18
2.3 电子配置和过渡金属	18
2.3.1 各元素的电子配置	18
2.3.2 过渡金属具有复杂及复数的化合价	20
2.4 铁与稀土类元素的磁性来源	20
2.4.1 铁的磁性来源于3d轨道的同向旋转	20
2.4.2 稀土元素的磁性来源于被外部电子层遮蔽的4f轨道和 轨道上的电子自转	22
2.5 原子集体中的电子轨道	22

2.5.1	原子一旦形成集合体, 其电子轨道则变成能量连续的电子能带	22
2.5.2	金属键结合的原子被自由电子云所包围, 不存在禁带	23
2.5.3	半导体和绝缘体存在禁带, 自由电子很难翻越	23
2.6	自由电子与光电学特性	24
2.6.1	电传导和热传导均来源于自由电子	24
2.6.2	金属光泽也是由于自由电子的作用	25
2.6.3	金属的电子释放与光电效应	25
2.7	金属结晶的特征	26
2.7.1	面心立方晶格 (FCC) 的原子排列最密集	26
2.7.2	密排六方 (HCP) 排列密度大, 但点阵对称性差	27
2.7.3	体心立方 (BCC) 排列间隙最大, 但对称性好	27
2.8	各种各样的晶体结构和非晶体结构	28
2.8.1	共价键和离子键结合的晶体强度高, 但韧性极差	28
2.8.2	石墨是共价键和范德华力的结合	29
2.8.3	无秩序的非晶态结构	30
2.9	晶格缺陷与相分离	31
2.9.1	温度上升会导致晶格振动和原子间距加大	31
2.9.2	实际金属结晶中含有着大量的缺陷	31
2.9.3	异种元素进入金属结晶, 会发生固溶或相分离	32
2.10	纯金属与合金的凝固	32
2.10.1	纯金属是在某一固定温度下缓慢凝固	32
2.10.2	合金因在一定温度区间内凝固, 因此存在浓度变化	33
2.10.3	无限固溶型合金相图	33
2.11	共晶型合金的相图	34
2.11.1	固相元素如果无法固溶则形成两相分离	34
2.11.2	共晶组织是在一定温度下凝固形成的层状组织	34
2.11.3	共晶成分以外形成初晶和共晶的混合组织	36
2.12	金属间化合物和多元系相图	36
2.12.1	纯金属中有可能会出现难以预想的中间化合物	36
2.12.2	各种类型的相图	37
2.13	合金的自由能曲线	38
2.13.1	纯物质的自由能和相变	38
2.13.2	利用自由能 (G) 曲线理解合金相图	39
2.14	铁-碳相图	40

2. 14. 1	纯铁的固态相变和铁-碳二元相图	40
2. 14. 2	共析反应、珠光体相变和碳元素的固溶线	40
2. 14. 3	利用奥氏体或铁素体形成元素进行合金设计	41
2. 15	平衡状态与反应速度	42
2. 15. 1	反应速度受驱动力和易动度的控制	42
2. 15. 2	相变、扩散是热活化过程, 驱动力来自于过冷度或浓度差	42
2. 15. 3	反应速度用 C 曲线来表示	43
2. 16	形核与成长	43
2. 16. 1	新相形成的条件是需要具有新的界面形成能	43
2. 16. 2	无芽(核)胚生成的 Spinodal 分解	44
	小知识	45
3	金属变形与组织控制	48
3. 1	金属组织与结晶学的发展	48
3. 1. 1	从金属组织的可视化发展到相图	48
3. 1. 2	X 射线结晶学的确立以及对塑性变形的理解	48
3. 2	金属的变形	50
3. 2. 1	金属具有延展性, 可塑性加工	50
3. 2. 2	弹性和塑性变形的应力-应变曲线	50
3. 2. 3	弹性变形的斜率决定构造物的刚性	51
3. 3	塑性变形原理	52
3. 3. 1	滑移变形和位错移动	52
3. 3. 2	晶体结构基本决定位错的滑移面与滑移方向	53
3. 3. 3	如果位错无法移动, 则会产生双晶变形	54
3. 4	钢铁的屈服现象及晶体晶界	55
3. 4. 1	铁的初始变形困难	55
3. 4. 2	如果位错能移动的话, 则导致顺利变形	56
3. 4. 3	晶界是位错移动的障碍	56
3. 5	加工硬化与塑性各向异性	57
3. 5. 1	金属的韧性来源于其高加工硬化指数 (n 值)	57
3. 5. 2	拉伸变形时, 试样是厚度变薄还是宽度变窄 (r 值)	58
3. 5. 3	应变速率敏感指数 (m 值) 导致超塑性	59
3. 6	热处理基础知识 I	59
3. 6. 1	热处理主要适用于容易控制扩散的金属材料	59
3. 6. 2	利用高温扩散获得均匀的组织: Soaking (均匀化处理)	60

3.6.3	利用温度变化获得非平衡相组织：淬火和回火	61
3.7	热处理基本知识 II	61
3.7.1	加工应变的释放：重结晶和退火	61
3.7.2	利用相变改善组织结构：正火	62
3.7.3	表面渗碳或渗氮强化：渗碳淬火、渗氮处理	63
3.8	马氏体相变	64
3.8.1	无扩散的剪切型相变	64
3.8.2	钢中的马氏体因固溶碳原子，因此又硬又脆	65
3.8.3	钢铁冷却组织的指南：CCT 和 TTT 曲线	65
3.9	回火时效	66
3.9.1	利用不同温度下固溶元素的溶解度差异进行时效硬化	66
3.9.2	杜拉铝的硬度来自于亚稳析出物所产生的晶格变形	66
3.9.3	利用马氏体相变和时效强化获得马氏体时效钢	67
3.10	高强度化的原理	68
3.10.1	我们希望获得高强度、高塑性和低脆性的材料	68
3.10.2	材料强化的基本方式：固溶强化、析出强化和细晶强化	68
3.10.3	高温材料的分散强化	69
3.11	微量成分的控制与应用	70
3.11.1	控制微量不纯物质降低危害	70
3.11.2	利用氧化物、碳化物、氮化物和热加工工艺综合控制 材料组织结构	71
3.12	断面与破坏形式	72
3.12.1	塑性破坏与危险的脆性破坏	72
3.12.2	解理破坏的特征	72
3.12.3	晶界破坏的特征	73
3.13	延迟破坏和应力腐蚀破坏	73
3.13.1	经过一段时间后突然发生的破坏——延迟破坏	73
3.13.2	几乎所有的合金都会产生应力腐蚀	74
3.14	疲劳破坏和蠕变破坏	75
3.14.1	循环往复的低应力也会导致破坏	75
3.14.2	高温环境下材料的蠕变变形和蠕变破坏	76
小	知识	77
4	结构材料和强度材料	81
4.1	人类与金属的关系	81

4.1.1	铁制品具有 3700 年的历史, 是现代文明社会的基础	81
4.1.2	铝、镁、钛主要利用电力冶炼	81
4.2	制铁方法和钢铁材料概论	83
4.2.1	巧妙地利用铁碳相图, 采用间接制铁法制铁	83
4.2.2	高强度的高碳钢和易加工与焊接的低碳钢	83
4.2.3	使用量最多的钢铁材料是建筑用钢和汽车用钢板	84
4.3	高碳钢和工具钢	85
4.3.1	铁和渗碳体结构可获得 4000MPa 的高强度	85
4.3.2	渗碳体的球化可导致基体软化和碳化物组织均匀分散	86
4.3.3	坚硬、稳定的合金碳化物能有效提高钢材的耐热性和 耐磨损性能	86
4.4	焊接结构钢	87
4.4.1	大型结构件需要电弧焊接	87
4.4.2	高温加热和急速冷却会导致热影响区又硬又脆, 极易断裂	88
4.5	冲压成型用钢板	89
4.5.1	精确控制碳含量生产出丰富多彩的钢板	89
4.5.2	深冲成型时 r 值、拉伸成型时 n 值非常重要	90
4.6	不锈钢的基本知识	91
4.6.1	什么是不锈钢	91
4.6.2	Cr 会形成惰性氧化膜抑制生锈	91
4.6.3	铁-铬合金中存在的 σ 相或相分离, 是导致脆化的原因	92
4.6.4	晶界形成铬的碳化物导致腐蚀开裂	93
4.7	各种各样的不锈钢	93
4.7.1	舍夫勒组织图	93
4.7.2	铁素体系不锈钢: 近年来性能大幅提高	94
4.7.3	奥氏体系不锈钢: 世界的主流产品 18-8 不锈钢	95
4.7.4	马氏体系、沉淀硬化系、双相系不锈钢	96
4.8	耐热合金	96
4.8.1	可承受 600℃ 高温的建筑用耐火钢	96
4.8.2	建筑物用耐热不锈钢系材料	97
4.9	超级合金	99
4.9.1	700 ~ 800℃ 以上就必须使用超级合金	99
4.9.2	发动机排气阀需要耐高温和耐磨损的材料	100
4.10	核反应堆发电基本原理	100
4.10.1	日本国内的商用核反应堆都是轻水炉	100

4.10.2	水不光具有热传导功能,还具有中子减速功能	101
4.10.3	铀燃料、燃料组件和控制棒的配置	101
4.11	核反应堆用材料	102
4.11.1	中子反应控制材料	102
4.11.2	燃料棒包壳管采用的是锆-锡合金	103
4.11.3	管道材料采用奥氏体系不锈钢	103
4.12	低温用材料	104
4.12.1	极低温使用 FCC 金属,对于 BCC 的钢铁材料则需要采取相应的防脆措施	104
4.12.2	LNG 船采用 FCC 金属,但热膨胀导致的变形是个问题	105
4.12.3	LNG 储藏罐采用 Ni 合金钢,输气管道采用 TMCP 钢	105
4.13	铝合金	106
4.13.1	铝的制备、赤泥与铝合金分类	106
4.13.2	铝发现至今仅仅 200 年,是可以柔硬自如的材料	107
4.13.3	铸造铝合金首先应考虑选用流动性良好的 Al-Si 合金	108
4.13.4	各种各样的压延材制品可采用压延、锻造、挤出等方式加工	108
4.14	航空用材料	109
4.14.1	杜拉铝最为普遍,但其最大的问题是应力腐蚀开裂	109
4.14.2	未来是碳纤维复合材料、钛合金与铝合金的竞争	110
4.15	汽车用材料	111
4.15.1	汽车车身为薄钢板轧制+焊接成型	111
4.15.2	高档车开始增加铝合金的使用量	111
4.16	镁合金	112
4.16.1	密度小但加工性能差	112
4.16.2	采用压铸法可生产各种形状的工件	112
4.16.3	Mg 合金的加热挤出、加热轧制成型法	113
4.17	纯钛	114
4.17.1	钛是金属中的超级明星,从发现至今仅仅只有百年	114
4.17.2	常温下是难以变形的 HCP 晶体结构,温度上升则会变成较易加工的 BCC 晶体结构	114
4.17.3	纯钛在工厂、建筑物上的使用在不断扩大	115
4.18	钛合金	116
4.18.1	合金化可提高钛合金的强度与加工性	116
4.18.2	钛合金主要为 Ti-Al-V 合金, β 合金也日益受到关注	116

4. 18. 3	金属钛的热传导率低, 因而切削性能差	118
4. 19	形状记忆合金和超弹性合金	118
4. 19. 1	可逆马氏体相变导致形状恢复	118
4. 19. 2	形状记忆根据孪晶比例变化而变形, 加热可导致形状恢复	119
4. 19. 3	超弹性、形状记忆合金广泛应用于工业及医疗领域	120
4. 20	钨与超硬合金	120
4. 20. 1	高熔点钨采用粉末冶金法制造	120
4. 20. 2	钴包裹碳化钨形成的硬质合金	121
4. 21	粉末冶金	122
4. 21. 1	极易制成形状复杂的小尺寸零件	122
4. 21. 2	烧结是利用表面能作为驱动力进行材料致密化的方法	123
4. 21. 3	金属原料粉末采用熔融金属吹入水/气体中速冷获得	123
	小知识	124
5	金属功能材料	126
5. 1	电子材料的发展	126
5. 1. 1	铜是最古老的金属, 也是现代最主要的电子功能材料	126
5. 1. 2	电磁感应是电子学的起点	126
5. 1. 3	金属是信息时代的基础	127
5. 2	纯铜	128
5. 2. 1	日常的电线使用的是韧铜, 音响器材使用的是无氧铜	128
5. 2. 2	铜的导电性好但密度大	128
5. 2. 3	电路板、电池使用的铜箔: 压延法和电解法	129
5. 3	纳米铜	129
5. 3. 1	纳米技术是当今材料科学研究中最热门的领域之一	129
5. 3. 2	纳米铜的制备方法多种多样	130
5. 3. 3	目前国内较高性价比的纳米铜制备技术	130
5. 4	铜合金	131
5. 4. 1	黄铜为铜锌合金, 青铜为铜锡合金	131
5. 4. 2	导电性与强度均为良好的铍铜合金	132
5. 4. 3	半导体连线从铝改为铜	132
5. 5	调整线膨胀系数和热传导率	133
5. 5. 1	通常希望金属材料的线膨胀系数小而热传导率大	133
5. 5. 2	铁与镍可制成线膨胀系数为零的合金	133
5. 6	磁性材料的基础知识	134

5.6.1	什么是铁磁体的自发磁化	134
5.6.2	软磁性 (Soft) 与硬磁性 (Hard) 材料	135
5.6.3	超过居里温度, 铁磁材料会变为顺磁材料	136
5.7	软磁钢板	136
5.7.1	织构硅钢片中利用 Si 提高合金电阻率、控制结晶方位	136
5.7.2	为了减少交变磁场中的涡电流损耗, 铁芯大多采用叠片式结构	137
5.8	非晶软磁薄带	138
5.8.1	输电和配电过程中有 5% 的电损	138
5.8.2	空载负荷 (铁损) 损失小的非晶态合金	139
5.9	铁氧体 (铁的氧化物)	140
5.9.1	各种各样的铁氧化物	140
5.9.2	铁为铁磁性、氧化铁则为亚铁磁性	140
5.9.3	高频元件中的软磁铁氧体和小型马达中的硬磁铁氧体	141
5.10	稀土类永磁材料	142
5.10.1	领先世界的日本磁性材料研究	142
5.10.2	超强磁性的稀土永磁材料	142
5.10.3	钕磁铁粉末在磁场中成型, 采用液相烧结法制作	143
5.11	耐热钕磁铁	144
5.11.1	为了提高钕磁铁的耐热性, 需要添加镨元素	144
5.11.2	Nd 在地球上分布较广, 而 Dy 分布集中	144
5.11.3	在逆磁畴易出现区域提高 Dy 浓度以降低添加量	145
	小知识	145
6	金属表面化学	147
6.1	材料与环境的界面	147
6.1.1	材料与环境的相互作用	147
6.1.2	界面是材料与环境创造的新世界	148
6.2	电子传导与离子传导	149
6.2.1	电流是带电粒子的流动	149
6.2.2	电导体	149
6.2.3	离子导体	150
6.3	水溶液中的金属离子	151
6.3.1	电解质水溶液	151
6.3.2	水溶液中的金属络合物	152