

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



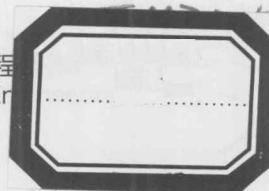
电工钢的 材料学原理

**Material Science Principles
on Electrical Steels**

毛卫民 杨 平 编著



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS



电工钢的 材料学原理

Material Science Principles on Electrical Steels

毛卫民 杨 平 编著

OXUE YUANLI

DIANGONG



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

图书在版编目(CIP)数据

电工钢的材料学原理 / 毛卫民, 杨平编著. --北京:
高等教育出版社, 2013. 8

(材料科学与工程著作系列)

ISBN 978-7-04-037692-0

I. ①电… II. ①毛… ②杨… III. ①电工钢-材料
科学 IV. ①TM275

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 133790 号

策划编辑 刘剑波

责任编辑 焦建虹

封面设计 姜磊

版式设计 杜微言

插图绘制 尹莉

责任校对 刘春萍

责任印制 韩刚

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100120
印 刷 北京汇林印务有限公司
开 本 789mm×1092mm 1/16
印 张 40
字 数 720 千字
插 页 3
购书热线 010-58581118

咨询电话 400-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>

版 次 2013 年 8 月第 1 版
印 次 2013 年 8 月第 1 次印刷
定 价 69.00 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 37692-00

前言

电力是现代社会不可缺少的能源。图 0.1 给出了国际 Enerdata 能源资讯公司公布的过去二十年中国内地与欧美国家电能生产和消费情况的统计数据 (<http://www.enerdata.net/>)；可以看出，中国是当前全球电能生产和消费发展最快的国家，其发展速度明显高于发达国家；2010 年中国内地电能的生产和消费水平超过了欧洲整体，2011 年甚至超过了美国，达到年 4 万亿千瓦时以上的水平，成为全球最大的电能生产和消费地区。

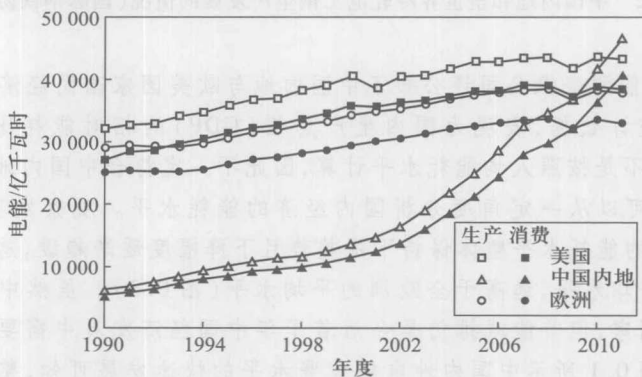


图 0.1 中国内地与欧美国家电能生产和消费情况 (Enerdata 能源资讯公司)

电能的生产、传输和使用过程离不开发电机、输电变压器、电动机以及各种镇流器、放大器、稳压器、继电器、整流器等电力、电气设备和电气元件，以便借助电磁学原理实现机械能电能转换、电压电流转换或机电设备驱动；其中电磁铁心是必不可少的组成部分。因此，制作铁心的软磁电工硅钢（简称电工钢或硅钢）的发展和电能消耗与电力、电气工业密切相关。根据总部位于比利时布鲁塞尔的国际钢铁协会 (<http://www.worldsteel.org/>) 所公布的数据，图 0.2 显示了中国内地和全世界冷轧电工钢生产发展的情况。可以看出，全世界目前电工钢的生产总量大约在 1 000 万吨，这一总量的增长幅度与中国内地电工钢总产量的

增长幅度基本同步,即近十年来中国内地电工钢生产量的上升带动了全世界电工钢产量的增长。国内电工钢产量的快速增长正是适应了国内电能消费增长的需求。2012年中国内地生产冷轧电工钢约642万吨,超过全世界总产量的一半,是电工钢生产的绝对第一大国,因而对全球电工钢的生产和应用有非常大的影响。



图 0.2 中国内地和全世界冷轧电工钢生产发展的情况(国际钢铁协会)

Enerdata 能源资讯公司还公布了中国内地与欧美国家国民经济发展中能源使用效率的统计数据,表现为国内生产总值(GDP)的相对能耗比率参数(图 0.3);该参数不是按照人均能耗水平计算,因此不一定符合中国内地经济发展的实际情况,但从一定角度分析国内经济的能耗水平。观察发现,近二十年来,中国经济的能耗水平整体保持下降趋势且下降幅度逐渐趋缓,总体上仍高于美国和世界平均水平,远高于全欧洲的平均水平(图 0.3)。虽然中国人均能耗远低于欧美国家,但节能减排仍是今后若干年中国经济发展中需要不断改善的课题。参照图 0.1 所示中国内地电能消费水平的快速发展可知,整体能耗水平中电能的消耗占据了重要的位置。随着国内电能消费和电工钢使用量的持续增长,电工钢技术质量的改进,尤其是工作效率的提高和能耗水平的减小也会对降低生产总值的相对能耗比率参数产生重要影响。

从产量和产能上看,虽然中国是电工钢生产的大国,但其技术质量和性能水平与发达国家尚存在明显差距。据中国金属学会电工钢分会 2013 年的统计,尽管 2012 年中国内地生产了约 642 万吨冷轧电工钢,但同时还生产了目前国际上已经淘汰而只在中国尚存在的 48 万吨高耗能热轧电工钢;与此同时,全年进口了约 71 万吨电工钢,其中 80% 以上为超低能耗、高技术质量的或国内尚不具备相关技术的产品。由此可见,国内电工钢不仅产量不能满足需要,而且生产的技术实力也还远不够强大,不能适应国内经济发展,尤其是可持续发展的需求。

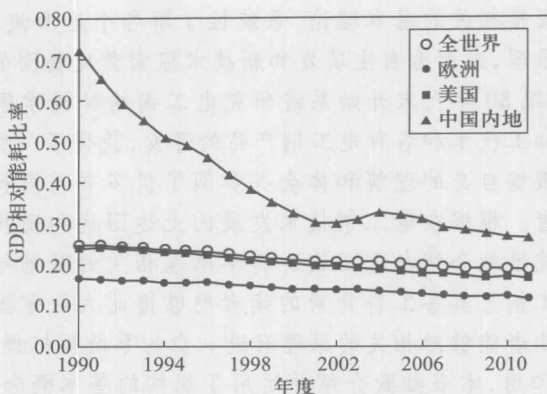


图 0.3 GDP 相对能耗比率参数的变化(Enerdata 能源资讯公司)

尽管图 0.2 显示了国内电工钢生产快速发展的现象,且有三十余家生产冷轧电工钢的企业;但 80% 的企业是近几年涌现的新生电工钢生产企业,其现有质量水平和技术积累仍保持在较初级的阶段,所生产的产品也大多是低技术质量的产品,在技术进步上还有很大的发展空间。

与多数普通钢铁产品相比,电工钢是一种技术含量较高的产品。人们在刚刚进入电工钢生产领域时往往会遇到一些困扰和技术瓶颈。多数普通钢铁产品均属于主要利用其强度、塑性、韧性等力学性能的结构材料,而电工钢则属于主要利用其软磁性能的功能材料;两者虽然在生产流程上大体一致,但性能需求上的不同会导致在成分设计、微观的组织结构演变原理及其影响、加工工艺精细控制等多方面存在一定差异,如果忽视这种差异则很难获得技术质量良好的电工钢产品。与多数其他钢铁产品相比,电工钢内的晶粒取向和整体组织对其软磁性能的提高有极为重要的影响;然而取向和组织的概念比较抽象,人们往往对钢板组织形成和转换的原理不够了解。尤其在现代组织定量分析技术日益广泛使用的今天,如果对组织原理及现代分析方法缺少了解和掌握,就很难在电工钢软磁性能改善上取得突破,更难取得技术创新。如图 0.2 所示,目前虽然可以从电工钢的生产上看到长足的发展,但在电工钢组织结构控制原理的阐述上还存在不少世界性难题,因而在产品质量的稳定控制和新技术的发展上仍存在不少障碍。另一方面,由于高技术含量电工钢生产技术的敏感性以及经济利益的驱动,在电工钢行业内存在很强的各种形式的技术壁垒,使得电工钢技术的交流和学术探讨难以顺畅实施,妨碍了电工钢的相关理论和工艺技术的快速提高与创新性发展。面对电工钢技术现状的上述种种困扰,要想推进高技术质量电工钢的快速发展,尤其对刚刚进入电工钢领域的相关技术和科研人员来说,特别需要扎

实掌握与电工钢直接相关的基本理论,系统性了解各个生产流程和工艺环节的原则思路和控制原理,进而为自主研发和新技术探索奠定稳固的基础。

作者自 20 世纪 80 年代末开始系统研究电工钢的材料学原理,随后开展了多种电工钢生产加工技术和各种电工钢产品的开发,获得了一些粗浅的经验、成果和认识。作者根据自身的理解和体会并参阅了很多书刊资料,草拟本书以奉献给广大专业读者。根据在电工钢技术发展的上述困扰和现状,本书在撰写过程中特别注重系统性地介绍与电工钢材料学原理相关的基础知识和基本理论,希望不很了解电工钢且具备工科背景的读者能够借此大致掌握相关原理,也希望了解电工钢的读者能够对相关的原理有进一步的系统性把握。基于织构对新型电工钢的重要作用,本书细致介绍并运用了织构的基本概念、织构表达方法、织构定量分析方法以及电工钢织构形成和演变的基本原理。为帮助读者形成自己的研究和技术开发能力,本书在介绍基础理论的基础上较系统地介绍了国内外电工钢开发研究的基本思路和典型成果,从不同角度探讨了现有对解决各种电工钢学术难题方面的尝试和成果;同时,也介绍了在不同电工钢新产品研究和开发方面的种种尝试和阶段性进展。希望本书能伴随着电工钢工业生产的进一步发展和对创新技术持续不断的探索,为电工钢的科学研究提供一定的借鉴和启发;也希望能为生产企业电工钢新品种的研制、技术的自主更新以及新技术开发提供一定的参考。鉴于与合作单位相关协议条款的限制,作者仅借助各种公开的文献资料和技术手段阐述相关的原理和规律。尽管如此,作者仍希望本书能对读者的相关学习和工作提供有价值的参考。由于作者的认识水平十分有限,书中谬误在所难免,恳请读者给予指正。

作者感谢近二十年来北京科技大学历届投入电工钢研究和技术开发的研究生对相关科技发展所做的贡献;也感谢武汉科技大学袁泽喜教授,太原钢铁公司张文康博士,北京科技大学李长荣教授、叶丰教授、王新华教授和刘洋博士为本书提供了部分资料和技术支持,感谢王开平高工为本书制作和处理了大量图片。作者还特别感谢国家自然科学基金(资助号:50871015、51171019、51071024)和科技部(资助号:863 计划 2012AA03A505)对作者相关科研工作的资助,以及各地电工钢企业长期以来对作者相关科研工作的关心、支持和帮助。

作者

2013 年 4 月 20 日

目 录

第 1 章 电工钢金属学基础概述	1
1.1 铁基晶体的基本结构特点	1
1.1.1 铁的基本特性	1
1.1.2 晶体结构	2
1.1.3 晶面与晶向	4
1.1.4 铁晶体的旋转对称性	8
1.2 铁晶体的取向与多晶体织构	9
1.2.1 取向与织构的定义	9
1.2.2 极射赤面投影图	13
1.2.3 反极图	16
1.2.4 取向分布函数	17
1.2.5 $\{100\}$ 及 $\{111\}$ 织构占有率的计算	20
1.2.6 $\{011\}$ $\langle 100 \rangle$ 织构占有率的计算	21
1.3 铁晶体中的缺陷	23
1.3.1 位错的概念与类型	23
1.3.2 位错应力场和位错能量	25
1.3.3 铁中位错的滑移与增殖	28
1.3.4 空位	32
1.3.5 晶界的结构	35
1.3.6 表面结构	39
1.4 铁基固溶体	41
1.4.1 铁基固溶体的类型与特点	41
1.4.2 固溶元素的平衡偏析	43
1.4.3 固溶元素的非平衡偏析	46
1.4.4 铁基固溶体固溶元素的扩散	48
1.4.5 多晶固溶体中晶界的迁移	54
1.4.6 铁基固溶体基体的相变	60
1.5 电工钢中常见第二相	65
1.5.1 电工钢中常见第二相的晶体结构	65

1.5.2	电工钢常用二元相图	70
1.5.3	第二相结构中原子的概率占位	72
1.5.4	第二相粒子的固溶与析出行为	73
1.5.5	第二相粒子对晶界迁移的影响	77
	参考文献	79
第2章	电工钢的电磁学基础	83
2.1	铁基晶体的电磁学原理	83
2.1.1	基本磁学参数	83
2.1.2	铁基合金的磁化特点	84
2.1.3	电气元件铁心的交流磁化	88
2.1.4	铁心的涡流损耗	89
2.1.5	铁心的磁滞损耗与磁感应强度	90
2.2	铁基软磁晶体的各向异性	91
2.2.1	磁晶各向异性性能	91
2.2.2	磁致伸缩	92
2.2.3	弹性各向异性	95
2.3	铁基晶体电磁特性的微观机制	96
2.3.1	铁原子的磁矩与自发磁化	96
2.3.2	居里温度	98
2.3.3	磁畴结构	99
2.3.4	分畴现象	101
2.3.5	磁畴的畴壁迁移和磁矩转动	105
2.3.6	技术磁化过程	108
2.4	电工钢的磁特性及其应用	111
2.4.1	电工钢的主要性能要求	111
2.4.2	硅在电工钢中的作用	115
2.4.3	电工钢服役条件对钢板织构的要求	116
2.4.4	电工钢织构与磁晶各向异性性能的基本关系	122
2.4.5	电工钢的分类及其应用	123
	参考文献	127
第3章	电工钢加工过程中组织结构演变原理	130
3.1	凝固与连续铸造组织	130
3.1.1	连续铸造的基本过程	130
3.1.2	连续铸坯凝固组织的形成	131
3.1.3	柱状晶区的选择生长及凝固织构	133

3.2	冷轧变形组织及变形机制	135
3.2.1	电工钢的冷轧变形组织特点	135
3.2.2	冷轧变形过程中滑移系的开动	137
3.2.3	冷轧变形过程中的机械孪生	140
3.2.4	冷轧变形过程中的多系滑移和晶粒取向的变化	142
3.2.5	轧制变形亚结构与剪切带	144
3.3	冷轧变形织构	145
3.3.1	冷轧织构的形成过程	145
3.3.2	冷轧变形过程中取向变化的计算方法	149
3.3.3	铁素体冷轧织构的理论模拟	151
3.3.4	初始织构与溶质原子对冷轧织构的影响	155
3.3.5	外加剪切应力作用下的冷轧织构	158
3.4	再结晶组织	162
3.4.1	电工钢再结晶的基本过程	162
3.4.2	冷变形铁素体的回复	164
3.4.3	再结晶形核	166
3.4.4	再结晶动力学	168
3.4.5	再结晶晶粒在变形基体内的生长	171
3.4.6	再结晶织构	175
3.5	晶粒长大与二次再结晶	179
3.5.1	晶粒的正常与异常长大	179
3.5.2	第二相粒子诱发异常长大	183
3.5.3	织构诱发异常长大	184
3.5.4	表面能诱发异常长大	186
3.6	热变形与动态再结晶	189
3.6.1	动态回复	189
3.6.2	动态再结晶的基本过程	190
3.6.3	电工钢的热轧变形行为	195
3.6.4	热轧变形过程和相变对织构的影响	198
	参考文献	203
第4章	无取向电工钢技术原理	208
4.1	无取向电工钢的基本成分	208
4.1.1	基本的合金化设计	208
4.1.2	无取向电工钢中的各种元素的基本存在状态	209
4.1.3	无取向电工钢中的间隙原子 C 和 N	212

4.1.4	无取向电工钢中常规的非金属杂质元素 S 和 P	214
4.1.5	无取向电工钢中常规的非碳化物粒子形成元素 Al 和 Mn	216
4.1.6	无取向电工钢的其他外来元素	220
4.2	无取向电工钢的组织结构	233
4.2.1	无取向电工钢的晶粒组织	233
4.2.2	第二相粒子及微量元素	237
4.2.3	无取向电工钢中的织构	241
4.2.4	无取向电工钢中第二相粒子和微量元素对织构的影响	251
4.3	无取向电工钢的加工	256
4.3.1	无取向电工钢常见的工业品种和类型	256
4.3.2	常规工业生产流程中的组织演变与控制	262
4.3.3	脱碳型无取向电工钢	281
4.3.4	无取向电工钢的力学性能及冲片性能	288
4.3.5	工艺改进及新工艺流程开发	292
4.3.6	薄板坯连铸连轧生产流程	297
4.4	无取向电工钢的磁时效	302
4.4.1	无取向电工钢的磁时效现象	302
4.4.2	产生磁时效的基本原理	304
4.4.3	冷变形对磁时效的影响	308
4.4.4	织构与磁时效的关系	310
4.4.5	无取向电工钢生产的过时效处理	314
	参考文献	319
第 5 章	取向电工钢技术原理	331
5.1	取向电工钢的基本知识	332
5.1.1	取向电工钢的基本特点	332
5.1.2	取向电工钢的基本成分	335
5.1.3	取向电工钢的化学成分及抑制剂设计原理	337
5.1.4	取向电工钢的基本制备工艺	343
5.2	普通取向电工钢(CGO)加工的材料学原理	346
5.2.1	CGO 钢热轧和常化组织	346
5.2.2	CGO 钢一次冷轧及中间退火组织结构	349
5.2.3	CGO 钢二次冷轧及脱碳退火组织	352
5.2.4	CGO 钢二次再结晶组织	354
5.2.5	CGO 钢中的 AlN 和 Cu_2S 抑制剂粒子	358

5.3	高磁感取向电工钢(HiB)加工的材料学原理	362
5.3.1	HiB 钢热轧组织	363
5.3.2	HiB 钢常化组织	365
5.3.3	HiB 钢一次冷轧及脱碳退火组织	367
5.3.4	HiB 钢二次再结晶组织	371
5.3.5	HiB 钢磁畴的细化	375
5.3.6	取向电工钢薄带的加工	384
5.4	取向电工钢 Goss 织构形成的基本原理	389
5.4.1	热轧 Goss 织构的形成规律	390
5.4.2	Goss 取向晶粒在单晶体变形与再结晶过程中的行为	394
5.4.3	冷轧压下量对 Goss 织构的影响	399
5.4.4	取向电工钢表层组织和 Goss 织构对二次再结晶的影响	404
5.4.5	热轧板冷轧方向对最终 Goss 织构的影响	414
5.4.6	二次再结晶过程中强 Goss 织构的形成规律	415
5.4.7	HiB 钢 Goss 织构形成理论的研究	430
5.5	CGO 钢加工过程中第二相粒子行为及其对组织结构的影响	441
5.5.1	热轧过程 MnS 抑制剂粒子的析出行为	441
5.5.2	冷变形过程中第二相粒子的行为	452
5.5.3	二次再结晶之前的晶粒正常长大及第二相粒子的钉扎效应	464
5.5.4	第二相粒子对二次再结晶过程中形成强 Goss 织构的作用	472
5.6	中低温取向电工钢的开发	489
5.6.1	后续渗氮低温取向电工钢的技术原理	490
5.6.2	俄罗斯法中温取向电工钢的技术原理	504
5.6.3	薄板坯连铸连轧低温取向电工钢	512
5.7	取向电工钢的涂层	521
5.7.1	脱碳退火时氧化膜的形成	521
5.7.2	玻璃膜的形成	524
5.7.3	绝缘层的形成	528
	参考文献	531
第 6 章	新型高性能电工钢的组织结构与性能	544
6.1	连铸坯柱状晶的组织结构对无取向电工钢 {100} 织构的影响	544
6.1.1	柱状晶的特点和热轧遗传关系	544
6.1.2	柱状晶冷轧组织及其冷轧取向遗传关系	551

6.1.3	柱状晶冷轧后的再结晶行为	556
6.1.4	柱状晶初始轧制方向及相应加工工艺参数对再结晶组织和磁性能的影响	559
6.1.5	柱状晶初始组织及相应加工工艺参数对再结晶组织和磁性能的影响	564
6.2	相变法高 $\{100\}$ 织构无取向电工钢	571
6.2.1	相变法的特点及成分特征	572
6.2.2	相变法制备工艺下的组织和织构	574
6.2.3	相变法制备 $\{100\}$ 织构钢板工艺研究	575
6.3	取向电工钢超薄带	581
6.3.1	取向电工钢超薄带的基本特点及三次再结晶	581
6.3.2	取向电工钢超薄带的制备工艺及薄带纯度的影响	582
6.3.3	超薄带制备过程的组织和织构演变规律	589
6.4	双取向电工钢	592
6.4.1	双取向电工钢的发展	592
6.4.2	影响轧板中立方取向晶粒稳定性的因素	595
6.4.3	立方织构 $\{001\}<100>$ 双取向电工钢的研究	596
6.4.4	旋转立方织构 $\{001\}<110>$ 双取向电工钢的研究	599
6.5	高硅含量电工钢及其特征	601
6.5.1	高硅含量电工钢的发展背景	601
6.5.2	高硅含量电工钢的相结构转变	602
6.5.3	相结构转变与位错结构	604
6.5.4	高硅含量电工钢塑性变形能力的改进	606
6.5.5	加工过程中高硅含量电工钢组织与织构的演变	609
	参考文献	614

第 1 章

电工钢金属学基础概述

本章仅对电工钢所涉及的金属学基础知识作一简单概述。

1.1 铁基晶体的基本结构特点

1.1.1 铁的基本特性

铁是一种最常见的、有银白色光泽的金属,它属于地壳中含量第二高的金属元素,仅次于铝,约占地壳质量的 5.1%。人类使用铁的历史可以追溯到公元前 3500 年,那时西亚人已经开始使用陨铁,而中国使用陨铁的历史则可以追溯到商代(约公元前 14 世纪)^[1],并懂得对陨铁作锻造加工。公元前 1300 年西亚出现了炼铁技术^[1],人类社会开始进入铁器时代。

铁是周期表中第 26 号元素,核外电子按顺序分别占据原子核外的 $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^2 3d^6$ 电子层,属于过渡族金属,相对原子质量为 55.85。铁的熔点在 $1\,534 \sim 1\,539^\circ\text{C}$ 之间,在室温的内部结构称为铁素体结构,温度升高超过 910°C 后会转变成奥氏体结构;温度升高超过 $1\,394^\circ\text{C}$ 后又会转变成铁素体结构,称为高温铁素体,并可保持到熔点。因此铁是随温度变化会发生相变的金属,其室温密度为 $7.86 \sim 7.9\text{ g/cm}^3$ 。

铁的导电、导热性能都比较好,室温电阻率约为 $0.13 \times 10^{-6}\ \Omega \cdot \text{m}$ ^[2], 20°C 电导率约为 $0.1 \times 10^8\ \Omega/\text{m}$ ^[2],室温导热系数约为 $76\text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ^[2],其热膨胀系数约为 $10^{-5}\ \text{K}^{-1}$ ^[2], $100 \sim 1\,000^\circ\text{C}$ 范围的比热容为 $0.5 \times 10^{-3} \sim 0.75 \times 10^{-3}\text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ^[3]。铁有很好的塑性,其室温延伸率可达 45% 以上。可很容易对铁作锻造、

轧制、挤压、冲压等加工,并制成板、带、型材,因此铁具有良好的变形和成形加工性能。

铁属于活泼金属,最常见的化合价态是+2和+3。铁在干燥空气中很难与氧气发生反应,但在潮湿空气中则很容易因电化学反应而被腐蚀,在酸性气体或卤素气氛中腐蚀更快。铁的化学活性使地壳中的铁都以离子的形式存在于化合物之中;只有在陨石中可以找到金属铁,陨石中通常还会含有一些镍、钴等元素^[1]。在自然界中铁的主要存在形式为:以 Fe_2O_3 为主的赤铁矿、以 Fe_3O_4 为主的磁铁矿、以 $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ 为主的褐铁矿、以 FeCO_3 为主的菱铁矿和以 FeS_2 为主的黄铁矿等。

铁是典型的铁磁性物质,具有优良的软磁特性;因此以铁为基础的电工钢成为被广泛使用的软磁材料。

1.1.2 晶体结构

工业上广泛使用的铁基合金由极为大量的铁原子聚集、堆砌而成。研究表明,这些原子并不是杂乱无章地堆砌,而是非常规则地排列在一起。图1.1显示了用高分辨率电子显微镜在铁素体中观察到铁原子微观规则排列的结构^[4,5];观察发现,铁原子在三维空间的排列是规则有序的,称为三维长程有序排列。原子三维长程有序排列而构成的物体都可以称为晶体,因此铁是晶体^[6]。

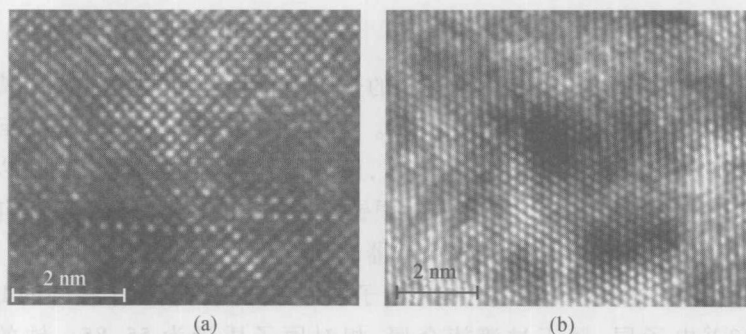


图1.1 用高分辨率电子显微镜在铁素体中观察到铁原子微观规则排列的结构^[4,5]
(原子最近邻距离为0.248 2 nm)

理论研究和实验检测表明,在三维铁素体空间内铁原子的堆垛和规则排列方式如图1.2(a)所示;为表达清楚起见,图1.2(a)着重绘制了铁原子在三维空间堆垛时表层附近原子的排列情况,用虚线表示内层原子。在大量规则排列的原子中,如果在特定的单元体范围内选取有限的一组原子,让其在三维空间内不断规则地重复排列,就可以构造出图1.2(a)所示铁素体晶体的三维结构。虽然

有很多种选取单元体范围的方法,但实际选取时往往需要该单元体范围尽可能小,同时单元体的形状参数应尽可能地反映出晶体所具备的旋转对称特征^[6]。如选取图 1.2(a)中深灰色的一组原子所占据的空间为单元体的范围,该单元体内原子三维排列的方式如图 1.2(b)所示,该单元体称为铁素体晶体的单胞;其中从观察角度出发,后面的铁原子用浅灰色和虚线表示。同样的分析表明,在三维奥氏体空间内铁原子的堆垛和规则排列方式如图 1.3(a)所示;为表达清楚起见,图 1.3(a)中只绘制了铁原子在三维空间堆垛时外层原子的排列情况,没有绘制外层后面的原子。选取图 1.3(a)中深灰色的一组原子所占据的空间为单元体的范围;该单元体内原子三维排列的方式如图 1.3(b)所示,把这个单元体看做奥氏体晶体的单胞。

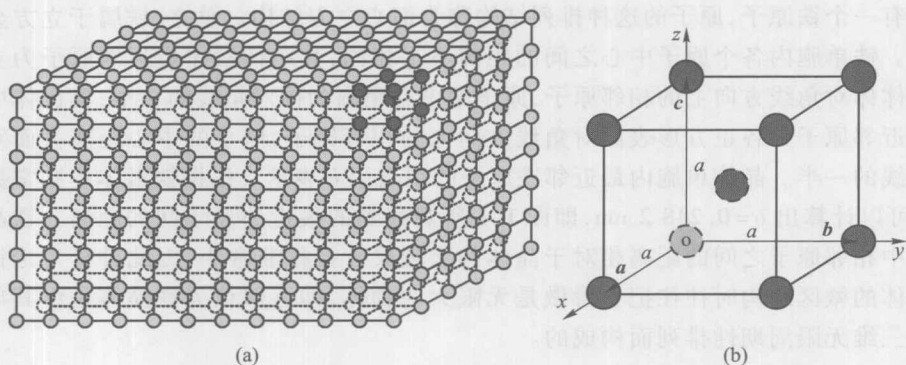


图 1.2 铁素体中(a)铁原子三维长程有序排列的方式及(b)其单胞结构

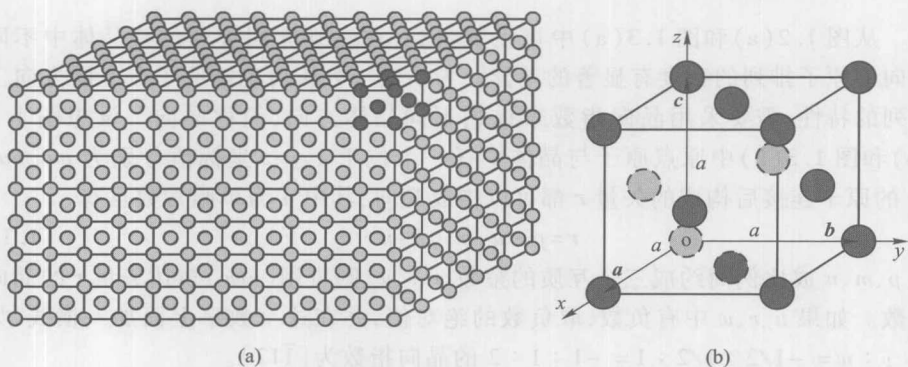


图 1.3 奥氏体中(a)铁原子三维长程有序排列的方式及(b)其单胞结构

如图 1.2(b)和图 1.3(b)所示,设单胞中记为“o”的原子为原点,把单胞的三个棱边设为 x 、 y 、 z 三个晶轴,则三个棱边的矢量分别为单胞矢量 a 、 b 、 c 。可以设想,把图 1.2(b)和图 1.3(b)的单胞沿 x 、 y 、 z 三轴分别作上、下、左、右、前、后

的周期性平移,平移矢量分别为 a 、 b 、 c 的任意整数倍,平移前、后的所有单胞累积在一起就可以构造出任意尺寸的、形如图 1.2(a) 和图 1.3(a) 所示铁晶体的三维结构。这种周期性平移的特性称为平移对称性。

实验分析与检测表明,铁素体和奥氏体单胞矢量 a 、 b 、 c 均互相垂直,且三个矢量的长度均相等;由此可知,图 1.2(b) 和图 1.3(b) 所示的单胞实际上是立方体。令 a 为单胞棱边的长度,称为单胞常数;X 射线检测显示室温铁素体的 a 为 0.286 7 nm,920 °C 奥氏体的 a 约为 0.364 77 nm^[7]。观察立方体单胞内的原子分布可以发现,立方体的八个顶角位置各有一个铁原子。此外,图 1.2(b) 立方体正中心有一个铁原子,原子的这种排列结构称为体心立方结构。立方体由上、下、左、右、前、后六个正方形表面构建而成。图 1.3(b) 每个正方形表面的中心都有一个铁原子,原子的这种排列结构称为面心立方结构。总之,铁属于立方金属。铁单胞内各个原子中心之间的距离不尽相同,其中铁素体最近邻原子为立方体体对角线方向上的相邻原子,原子的中心距离为体对角线的一半;奥氏体中最近邻原子为各正方形表面对角线方向上的相邻原子,原子的中心距离为面对角线的一半。晶体单胞内最近邻铁原子的距离用 b 表示。根据铁素体单胞常数 a 可以计算出 $b=0.248\ 2\text{ nm}$,即图 1.1 所观察到的最近邻原子间的距离。铁晶体中相邻原子之间的距离相对于晶体的宏观尺寸显得非常小,因此分析讨论铁晶体的微区结构时往往把它看做是无限大的物体,即近似认为铁晶体是由其单胞三维无限周期性排列而构成的。

1.1.3 晶面与晶向

从图 1.2(a) 和图 1.3(a) 中可以观察到,在三维周期排列的铁晶体中不同方向上原子排列的密度有显著的差异。为了便于分析讨论铁原子在不同方向上排列的特性,需要采用晶向指数来描述不同晶体方向,简称晶向。设想图 1.2(b) 和图 1.3(b) 中原点原子与晶体中任一个位于 x 、 y 、 z 坐标值分别为 pa 、 ma 、 na 的原子连接后构成的矢量 r 都可以构成晶向,其中 a 为单胞常数且有

$$r = p \cdot a + m \cdot b + n \cdot c \quad (1.1)$$

把 p 、 m 、 n 成比例简约成三个互质的整数 u 、 v 、 w ,则可用 $[uvw]$ 表达矢量 r 的晶向指数。如果 u 、 v 、 w 中有负数,取负数的绝对值,并在这个数字上面加一横线,如 $u : v : w = -1/2 : 1/2 : 1 = -1 : 1 : 2$ 的晶向指数为 $[\bar{1}12]$ 。

分析晶向时,晶体中的任何一个原子都可以看做是原点原子。图 1.4 给出了铁晶体坐标系内一些晶向指数的示例。互相平行且同向的晶向,其晶向指数相同;晶向指数 $[uvw]$ 和 $[\bar{u}\bar{v}\bar{w}]$ 互相平行但方向相反。可以看出,铁晶体的 x 、 y 、 z 晶轴构成了观察铁晶体内部原子分布情况的晶体坐标系;如果用晶向表示时,则铁晶体的 $[100]$ 、 $[010]$ 和 $[001]$ 晶向构成了晶体坐标系的三个基本晶轴。