

固态相变原理新论

刘宗昌 任慧平 计云萍 著



科学出版社

固态相变原理新论

刘宗昌 任慧平 计云萍 著

科学出版社

内 容 简 介

本书是 21 世纪以来国内外第一部关于固态相变原理新理论的专著,总结了国内外及作者多年来从事材料科学研究和固态相变理论研究的创新性成果,阐明了新理论。在内容上贴近工程实际,接近教学实践,促进新工艺、新材料研发,理论结合实际,促进理论向技术的转化和创新。全书共 8 章,内容包括固态相变的热力学、动力学、晶体学和组织学等,重点是固态相变产物的物理实质和相变机理。

本书可供材料热处理、冶金、铸造、锻压、焊接、压力加工、材料研发等行业的科研人员、技术人员参考,也可作为材料学、材料加工工程等专业的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

固态相变原理新论/刘宗昌,任慧平,计云萍著. —北京:科学出版社, 2015. 2

ISBN 978-7-03-043375-6

I. ①固… II. ①刘… ②任… ③计… III. ①固态相变—研究
IV. ①O414.13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 031217 号

责任编辑:牛宇锋 罗 娟 / 责任校对:桂伟利

责任印制:张 倩 / 封面设计:蓝正设计

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

文林印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 2 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2015 年 2 月第一次印刷 印张:31

字数:602 000

定价:135.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

刘宗昌简介



刘宗昌,男,1940年生,河北玉田人,内蒙古科技大学教授。1965年毕业于北京钢铁学院(现北京科技大学)金属学系。曾任中国热处理学会理事,内蒙古热处理学会理事长;现任《金属热处理》编委会高级顾问,《材料热处理学报》、《热处理技术与装备》、《热处理》等杂志编委会委员。

从事教学工作49年,讲授本科生和研究生课程,如金属学、金属热处理、金属材料学、固态相变、自然辩证法等,获得多项省部级教学改革成果奖、教学优秀奖和教学名师奖等。

1991年享受政府特殊津贴,1992年评为冶金部高校先进科技工作者,1993年获全国优秀教师称号并获得奖章,2007年评为内蒙古教学名师。

从事材料、固态相变理论和热处理新技术研究,完成横向、纵向课题30多项,为企业创造了显著的经济效益,获省部级科技进步奖10项,专利2项。在教学、科研实践中深入研究了固态相变理论,淘汰了过时的知识,修正了不正确的概念,批驳了错误的观点和学说,提出了固态相变新机制、新理论,发表学术论文280余篇。

出版学术专著、高等院校本科生和研究生教材17部,如《钢件淬火开裂及防止方法》、《珠光体转变与退火》、《过冷奥氏体扩散型相变》、《贝氏体与贝氏体相变》、《奥氏体形成与珠光体转变》、《马氏体相变》、《冶金类热处理及计算机应用》、《金属材料工程概论》、《金属固态相变教程》、《材料组织结构转变原理》、《金属学与热处理》、《固态相变》、《冶金厂热处理技术》、《热处理工程师必备理论基础》等。

E-mail: lzchang75@163.com

前 言

固态相变原理是材料工艺技术的理论基础,是技术创新的源泉。随着现代工业发展,实用的、创新性的相变理论和应用技术理论显得越来越重要。提高材料固态相变原理的理论水平,培养 21 世纪创新型材料工程技术人才,实现技术创新,提高产品质量,发展生产,对实现 2020 年建成创新型国家,实现中国梦,具有重要意义。

19 世纪末到 20 世纪上半叶,国外科学家在固态相变理论研究方面取得了长足的进步,而我国当时为清末和“中华民国”时期,腐败的政治和连年的战乱,缺乏开展材料科学研究的环境和条件。新中国成立后,大力开展材料科学研究,同时在 20 世纪 50~60 年代学习苏联材料科学和热处理理论,70~80 年代学习欧美日的固态相变理论,培养了一大批材料科学家,促进了我国材料科学的研究和金属材料工业的发展。20 世纪末以来,试验装备、仪器大幅度更新和增置,国家政策激励科研人员为实现中国梦而创新,取得了巨大进展,我国材料科学家的理论水平已经接近国际水平,在某些方面或已超过国际水平。多年来科学试验和教学内容研究发现,以往的固态相变理论并不完全正确,需要与时俱进地进行更新和修正,以适应材料科学和国民经济发展的需求。

21 世纪以来,内蒙古科技大学在进行金属材料、热加工工艺研发的同时,开展了固态相变理论的新试验、新观察和新探讨,提出了一系列新概念和新理论,力求为我国材料科学事业的发展添砖加瓦。本书就是这些科研和教学成果的总结。

本书在传承成熟的固态相变理论基础,阐明 21 世纪以来的新观察、新发现和新理论。涉及的问题主要包括固态相变的热力学、动力学、晶体学和组织学等,重点是固态相变产物的物理实质和相变机理,它是进行材料科学研究及工程应用的理论依据。现代金属材料工程专业覆盖了金属热处理、铸造、焊接、锻压、轧钢、金属腐蚀和表面技术等专业。固态相变原理是这些专业技术的必备基础理论,是解决实际问题的钥匙,是推动技术创新的源泉。

本书总结国内外及作者多年来从事材料科学研究和固态相变理论研究的创新性成果,采用继承与创新相结合的方法,阐明新理论。在内容上避开繁杂的理论模型和计算,贴近工程实际,接近教学实践,促进新工艺、新材料研发,注重理论与实践的密切结合,促进理论向技术的转化和创新。

本书的主要特点包括以下几个方面。

(1) 继承与创新相结合,既继承正确理论,也与时俱进地进行创新,与 20 世纪

出版的同类书刊相比,内容大幅度更新。

(2) 应用科学技术哲学理论(自然辩证法),根据新试验、新观察、新发现,研究修正陈旧的概念,淘汰过时和错误的知识,建立新概念,阐述新理论。

(3) 来源于工业实践,紧密结合实际,贴近教学及科技人员,具有实用性、可读性和前瞻性。

本书可供材料热处理、冶金、铸造、锻压、焊接、压力加工和材料研发等行业的科研人员、技术人员参考。教学实践表明,本书也可以作为材料学、材料加工工程等专业的教学参考书。

30年来作者及合作者试验研究并发表学术论文280余篇,出版教材8部,专著9部。本书是作者科研团队教学和科研成果的结晶。参加固态相变研究的有刘宗昌、任慧平、李文学、赵莉萍、计云萍、王海燕、段宝玉、李涛、韩强、高雪云等,以及历届研究生。全书共8章,内容由刘宗昌策划,第1、2、3、8章由刘宗昌撰写,第4、5章由刘宗昌和计云萍合作撰写,第6章由计云萍撰写,第7章由任慧平撰写,全书由刘宗昌负责统稿。

本书涉及研究得到国家及企业的资助支持,如国家自然科学基金,内蒙古自治区科技引导计划项目,内蒙古自治区高等学校科学研究项目,内蒙古自然科学基金,内蒙古科技大学创新基金等许多项目,以及多家企业的科研资助,特此致谢。

本书在撰写过程中,参考了国内外书刊等资料,在此谨向有关作者致谢。

作者

2014年12月

目 录

前言

第 1 章 导论	1
1.1 固态相变的分类	1
1.1.1 按平衡状态分类	2
1.1.2 按原子迁移特征分类	5
1.1.3 按热力学分类	6
1.2 铁的多形性及临界点	8
1.2.1 体心立方铁的热力学特征	8
1.2.2 铁的临界点 A_3 、 A_1 的形成	10
1.3 金属及合金整合系统	11
1.3.1 钢是整合系统不是混合系统	11
1.3.2 整体大于部分之总和	12
1.3.3 非线性相互作用	13
1.3.4 相变的复杂性	16
1.3.5 组织、性能的多样性	17
1.4 过冷奥氏体转变贯序	17
1.4.1 过冷奥氏体转变概述	18
1.4.2 高温区→中温区→低温区相变的演化	19
1.4.3 从两相共析形核向单相形核的演化	21
1.4.4 组织形貌的演化	21
1.4.5 亚结构的演化	22
1.5 相变热力学——过冷奥氏体转变的驱动力	24
1.5.1 珠光体转变的驱动力	25
1.5.2 贝氏体相变驱动力	26
1.5.3 贝氏体相变计算模型	30
1.5.4 马氏体相变驱动力	33
1.6 相变过程中原子的移动方式	36
1.6.1 相变过程中原子迁移的热力学	36
1.6.2 相变过程中原子的扩散	37
1.6.3 过冷奥氏体相变过程中原子的迁移方式	38

1.6.4	成分不变的原子热激活跃迁位移	39
1.6.5	原子位移方式不同是区别相变机制的重要判据	39
1.7	过冷奥氏体转变产物的表面浮凸	40
1.7.1	珠光体表面浮凸	40
1.7.2	贝氏体表面浮凸	42
1.7.3	马氏体表面浮凸	44
1.7.4	表面浮凸形成机理	45
	参考文献	48
第2章	奥氏体的形成	50
2.1	奥氏体的组织结构	50
2.1.1	奥氏体的组织形貌	50
2.1.2	奥氏体的晶体结构	51
2.1.3	奥氏体成分的不均匀性	52
2.1.4	奥氏体中的孪晶	53
2.1.5	奥氏体中的层错	56
2.1.6	奥氏体的性能	57
2.2	奥氏体形成机理	57
2.2.1	奥氏体形成的热力学条件	58
2.2.2	奥氏体的形核	58
2.2.3	奥氏体晶核的长大	62
2.2.4	碳化物溶解和奥氏体成分相对均匀化	66
2.2.5	奥氏体晶粒的长大	68
2.2.6	粗大奥氏体晶粒的遗传性	69
	参考文献	70
第3章	珠光体与共析分解	72
3.1	共析分解产物的组织形貌及其物理本质	72
3.1.1	珠光体的组织形貌	72
3.1.2	有色合金中的共析分解产物	75
3.1.3	珠光体的片间距	75
3.1.4	珠光体组织形貌的多样性	76
3.1.5	珠光体中的晶体学位向关系	77
3.1.6	珠光体的定义	79
3.2	过冷奥氏体共析分解机理	80
3.2.1	珠光体的形核	80
3.2.2	珠光体晶核的长大	89

3.2.3 钢中粒状珠光体的形成	93
3.3 “相间沉淀”是共析分解的特殊形式	98
3.3.1 “相间沉淀”的热力学条件	98
3.3.2 “相间沉淀”产物的形态	99
3.3.3 “相间沉淀”机制	100
3.4 先共析相的析出	103
3.4.1 亚共析钢中先共析铁素体的析出	103
3.4.2 先共析铁素体的析出速度	106
3.4.3 魏氏组织铁素体的形成	108
3.4.4 先共析碳化物的析出	109
3.4.5 伪共析转变	111
3.5 影响过冷奥氏体共析分解的内在因素	112
3.5.1 奥氏体化状态	112
3.5.2 奥氏体成分的影响	113
3.5.3 固溶稀土对相变的影响	115
3.5.4 合金元素对过冷奥氏体转变的整合作用	116
3.6 过冷奥氏体转变 C-曲线	119
3.6.1 钢中 TTT 图的类型	120
3.6.2 退火用动力学 C-曲线	125
3.7 固溶稀土的存在形式及对相变的影响	127
3.7.1 稀土在钢中的固溶	128
3.7.2 固溶稀土的存在形式	129
3.7.3 固溶稀土对相变的影响	131
参考文献	131
第 4 章 贝氏体与贝氏体相变	134
4.1 贝氏体相变的特征及定义	134
4.1.1 贝氏体相变的过渡性	134
4.1.2 贝氏体相变的其他特征	141
4.1.3 贝氏体和贝氏体相变的定义	143
4.2 贝氏体组织形态和亚结构	145
4.2.1 概述	145
4.2.2 铁基贝氏体的组织形貌	147
4.2.3 下贝氏体组织形貌	152
4.2.4 贝氏体组织中的亚结构	157
4.2.5 贝氏体碳化物	163

4.2.6 贝氏体中的位向关系	167
4.2.7 有色合金中的贝氏体	171
4.3 贝氏体相变的动力学特征	173
4.3.1 贝氏体铁素体长大速度	173
4.3.2 贝氏体相变动力学图的特征	178
4.3.3 影响贝氏体转变动力学的因素	186
4.4 块状相变	190
4.4.1 金属中的块状相变	190
4.4.2 块状相变的形核-长大	194
4.4.3 块状相变机制	195
4.4.4 块状相变与贝氏体相变的关系	196
4.5 贝氏体相变机制	197
4.5.1 贝氏体相变的切变学说和扩散学说	197
4.5.2 超低碳钢的贝氏体相变	198
4.5.3 奥氏体中的贫碳区与富碳区	204
4.5.4 贝氏体铁素体的形核	206
4.5.5 贝氏体铁素体晶核的长大	210
4.5.6 贝氏体碳化物形成机理	213
4.5.7 贝氏体相变既非切变机制,也非扩散机制	221
4.6 碳含量对贝氏体组织形貌的影响	223
4.6.1 碳含量对贝氏体组织形貌的影响	223
4.6.2 碳含量的影响机理	228
4.6.3 钢中贝氏体组织形成过程	230
4.7 贝氏体形核-长大的直接观察	231
4.7.1 一片贝氏体的形成	232
4.7.2 贝氏体片条群的形成	233
4.8 贝氏体相变学术论争简评	236
4.8.1 贝氏体相变学术观点的主要分歧	236
4.8.2 对两派学术论争的评价	238
参考文献	239
第5章 马氏体与马氏体相变	242
5.1 马氏体相变的分类、特征及定义	242
5.1.1 马氏体相变的分类	242
5.1.2 马氏体相变的特征	247
5.1.3 马氏体的定义	251

5.2 马氏体组织形貌及其物理本质	251
5.2.1 体心立方马氏体	252
5.2.2 体心正方马氏体	254
5.2.3 钢中马氏体的物理本质	264
5.3 马氏体的晶体结构及位向关系	264
5.3.1 钢中马氏体的晶体结构和碳原子的位置	265
5.3.2 马氏体中的位向关系和惯习面	274
5.3.3 马氏体的比体积	279
5.4 马氏体亚结构及形成机制	280
5.4.1 马氏体中的位错亚结构及其形成机制	281
5.4.2 孪晶亚结构及其形成机制	284
5.4.3 马氏体中脊及成因	290
5.5 马氏体相变的阻力和马氏体点	294
5.5.1 马氏体相变的阻力	295
5.5.2 切变能耗	299
5.5.3 马氏体点及应用	301
5.6 马氏体相变动力学	303
5.6.1 变温马氏体相变动力学	304
5.6.2 等温马氏体相变动力学	307
5.6.3 爆发型马氏体转变动力学	310
5.6.4 热弹性马氏体相变	311
5.6.5 表面马氏体转变	313
5.7 马氏体相变的切变机制及其误区	316
5.7.1 马氏体相变切变机制的研究历程及评价	316
5.7.2 马氏体相变晶体学的经典模型	318
5.7.3 依据位向关系设计切变模型不妥	325
5.7.4 马氏体相变切变机制的误区	326
5.8 马氏体相变的形核	331
5.8.1 马氏体相变的形核模型	332
5.8.2 马氏体相变形核的新观察	332
5.8.3 隐晶马氏体的形核	336
5.8.4 马氏体形核机制	336
5.8.5 马氏体临界晶核尺寸及形核功	339
5.9 马氏体相变新机制及晶核的长大	346
5.9.1 纯铁 $\gamma \rightarrow \alpha$ 马氏体相变机制	346

5.9.2	Fe-C 合金马氏体相变机制	352
5.9.3	马氏体晶核的长大	353
5.10	马氏体组织形貌的形成	357
5.10.1	马氏体组织呈现不同形貌的学说	357
5.10.2	马氏体组织形貌的演化	358
5.10.3	应变能是主导马氏体形貌演化的重要因素	362
5.10.4	隐晶马氏体组织及形成	366
5.11	马氏体形核-长大的直接观察	370
5.11.1	马氏体片形成的直接观察	371
5.11.2	马氏体形核长大过程的观察	376
5.11.3	关于马氏体长大速度	377
	参考文献	378
第 6 章	淬火钢的回火转变	382
6.1	Fe-C 马氏体的脱溶	382
6.1.1	新鲜马氏体在低温回火时性能的变化	382
6.1.2	碳原子的偏聚	384
6.1.3	Fe-C 马氏体脱溶时的过渡相	384
6.1.4	平衡相 θ -Fe ₃ C	387
6.2	回火时 α 相和残留奥氏体的变化	388
6.2.1	马氏体两相式分解的学说应当摒弃	388
6.2.2	α 相物理状态的变化	390
6.2.3	残留奥氏体的转变	394
6.3	合金马氏体的回火	397
6.3.1	Fe-M-C 马氏体脱溶时的平衡相	397
6.3.2	Fe-M-C 马氏体脱溶时的(温度、时间)贯序	398
6.3.3	合金马氏体的回火二次硬化	402
6.3.4	H13 钢淬火马氏体的回火及二次硬化	406
6.4	贝氏体的回火转变	410
6.5	回火组织的概念	416
6.5.1	回火马氏体	416
6.5.2	回火托氏体	417
6.5.3	回火索氏体	418
	参考文献	420
第 7 章	脱溶	421
7.1	脱溶热力学	422

7.2 调幅分解	424
7.2.1 调幅分解的合金系及组织	424
7.2.2 调幅分解的驱动力	425
7.2.3 调幅分解的上坡扩散	428
7.2.4 调幅分解的阻力	429
7.3 有色合金中的脱溶	430
7.3.1 Al-Cu 合金的脱溶	431
7.3.2 晶体缺陷对时效的影响	437
7.3.3 合金时效后的性能	439
7.4 含铜钢的脱溶	440
7.4.1 含铜钢的时效	441
7.4.2 含 Cu 钢脱溶 GP 区	442
7.4.3 含铜钢沉淀机制	446
7.4.4 含铜钢时效强化机制	446
7.5 含铜钢中 Cu 的脱溶与强化的计算	449
7.5.1 EET 理论与晶胞模型建立	450
7.5.2 价电子结构计算结果与分析	452
7.5.3 试验验证与分析	452
参考文献	454
第 8 章 固态相变研究新进展概要	456
8.1 新观察、新发现	456
8.1.1 奥氏体在片状珠光体中形核-长大	456
8.1.2 珠光体表面浮凸的试验发现	456
8.1.3 退火用 TTT 图	456
8.1.4 碳化物与贝氏体片主轴方向	456
8.1.5 贝氏体铁素体和奥氏体的高分辨像	457
8.1.6 贝氏体碳化物形核的观察	457
8.1.7 贝氏体铁素体长大速度的直接观测	457
8.1.8 贝氏体相变动力学图的特征	457
8.1.9 凸透镜状马氏体的立体形貌	458
8.1.10 K-S 关系普遍存在偏差	458
8.1.11 超低碳马氏体中存在孪晶亚结构	459
8.1.12 发现板条状马氏体中存在层错亚结构	459
8.1.13 实测板条状马氏体长大速度	459
8.1.14 马氏体相变形核地点新观察	459

8.1.15	固溶稀土对相变产生影响	460
8.1.16	过冷奥氏体转变贯序	460
8.1.17	含 Cu 钢脱溶 GP 区	460
8.2	新观点、新理论	461
8.2.1	以系统整合的方法进行固态相变研究	461
8.2.2	过冷奥氏体转变贯序	461
8.2.3	原子位移方式不同是区别相变机制的重要因素	461
8.2.4	奥氏体成分是不均匀的	462
8.2.5	珠光体的片间距	462
8.2.6	珠光体转变不存在领先相	463
8.2.7	珠光体的临界晶核尺寸和形核功	463
8.2.8	共析共生,共享台阶机制	463
8.2.9	关于“相间沉淀”	464
8.2.10	贝氏体相变最主要的特征是过渡性	464
8.2.11	超低碳贝氏体实际上是无碳贝氏体	464
8.2.12	贝氏体中的亚结构	464
8.2.13	贝氏体碳化物形成机制要点	465
8.2.14	块状相变机制	465
8.2.15	块状相变与贝氏体相变的关系	465
8.2.16	贝氏体临界晶核尺寸及形核功	466
8.2.17	贝氏体碳化物的形核问题	466
8.2.18	碳含量对贝氏体相变的影响	467
8.2.19	贝氏体的长大	467
8.2.20	马氏体相变的主要特征	468
8.2.21	马氏体中的 GP 区	468
8.2.22	马氏体相变的体积膨胀效应	468
8.2.23	切变机制的误区	469
8.2.24	马氏体高密度位错的形成机制	470
8.2.25	马氏体孪晶的形成机制	470
8.2.26	马氏体中脊的形成机制	470
8.2.27	马氏体晶核临界尺寸和形核功	471
8.2.28	马氏体中极高密度位错的形成	471
8.2.29	应变能是主导马氏体形貌演化的重要因素	472
8.2.30	隐晶马氏体组织的成因	472
8.2.31	马氏体两相式分解的学说应当摒弃	473

8.2.32 含铜钢中 Cu 的脱溶机制	473
8.3 重要概念和定义	473
8.3.1 整合	474
8.3.2 奥氏体及奥氏体的形成	474
8.3.3 混晶	474
8.3.4 珠光体和珠光体转变	474
8.3.5 贝氏体和贝氏体相变	475
8.3.6 马氏体和马氏体相变	475
8.3.7 回火组织的概念	475
参考文献	476

第 1 章 导 论

20 世纪中叶兴起应用系统科学的方法研究自然界的复杂性问题^[1]。按照科学技术哲学的理论,金属及合金是开放的复杂系统,其固态相变复杂多变。但是,在近代物理冶金研究中,由于条件的限制,将金属视为简单性问题,或将复杂性问题进行简单化处理,以便得出一定的规律性,这在当时是必要的。然而,实际上,金属、合金和钢,尤其是合金钢,都是复杂系统,属于复杂性问题,用研究简单性问题的方法往往难以得出精确的结论。

本书遵照科学技术哲学原理,阐明金属及合金的复杂性,指出各种金属、合金、钢及其合金钢都是复杂的整合系统,原子、晶格、相、组织是组成系统各个层次的要素,这些要素之间的非线性相互作用,使固态相变、组织形貌和性能等具有了复杂的物理实质和变化规律^[2]。奥氏体是钢中的重要组成相之一,将钢加热到临界点(A_1)以上,得到单一奥氏体状态,或奥氏体+碳化物等多相的整合状态,再以各种方式冷却到临界点以下,在不同的过冷度下,过冷奥氏体将分别发生各类复杂的相变。钢中的固态相变是迄今为止最为复杂的相变。过冷奥氏体从高温区到低温区的转变,即先共析铁素体析出(A_{F3})、二次渗碳体析出(A_{cm})→共析分解(珠光体转变)→贝氏体相变→马氏体相变是一个复杂的整合系统,是一个逐级演化的过程,各相变产物的组织结构具有复杂性和多样性,且相互之间存在密切的联系。20 世纪的研究,忽视了这一系统的整体性和关联性,对于珠光体转变、贝氏体相变、马氏体相变三者之间的整合关系缺乏应有的关注,没能建立完整的理论体系,应当以系统整合的方法研究过冷奥氏体的转变规律,尤其是中温区的贝氏体相变,具有过渡性,其组织结构、动力学、相变机制等各方面与马氏体相变、珠光体转变都有着千丝万缕的联系。马氏体相变与贝氏体相变存在密切的关系,但以往都孤立地进行切变机制的研究,没有将其视为过冷奥氏体整合系统中的一个子系统,因此陷入重重误区。

本书以大量新的试验事实和理论分析,全面、系统、结合实际地研究和阐述了金属整合系统中各类相变的演化规律。

1.1 固态相变的分类

分类是根据研究对象的共同点和差异点,将对象划分为不同种属的方法。材料组织结构转变极为复杂,种类繁多。在固态下发生相变重结晶的组织结构转变

属于固态相变,而塑性变形虽然引起组织变化,但不改变晶体结构,不属于固态相变。

按相变的平衡状态可以分为平衡相变和非平衡相变;按热力学分类,可分为一级相变和二级相变;按原子的迁移特征分类,可分为扩散型相变和无扩散型相变等。

1.1.1 按平衡状态分类

1. 平衡转变

定义:在极为缓慢的加热或冷却条件下形成符合状态图平衡组织的相转变,属于平衡转变。平衡转变一般有下列七种。

1) 纯金属的同素异构转变

定义:纯金属在温度和压力改变时,由一种晶体结构转变为另一种晶体结构的过程,称为同素异构转变。

金属的多形性是金属固态相变复杂性的根源。许多固态金属元素和非金属元素具有多种晶体结构,从元素周期表中查出具有多形性的元素均列在表 1-1 中。

表 1-1 元素的多形性

元素符号	元素名称	原子序数	晶型	元素符号	元素名称	原子序数	晶型
Fe	铁	26	α 体心立方 γ 面心立方 δ 体心立方 ϵ 密集六角	Mn	锰	25	α 复杂立方 β 复杂立方 γ 面心四方 δ 面心立方
Cr	铬	24	α 体心立方 β 密集六角	Hf	铪	72	α 密集六角 β 体心立方
Ce	铈	58	α 面心立方 β 密集六角	La	镧	57	α 密集六角 β 面心立方
Ca	钙	20	α 面心立方 β 密集六角	Co	钴	27	α 密集六角 β 面心立方
C _{金刚石} C _{石墨}	碳	6	钻石立方 六角	U	铀	92	α 正交 β 四方 γ 体心立方
W	钨	74	α 体心立方 β 复杂立方	Zr	锆	40	α 密集六角 β 体心立方
Np	镎	93	α 正交 β 四方 γ 体心立方	S	硫	16	α 正交 β 单斜