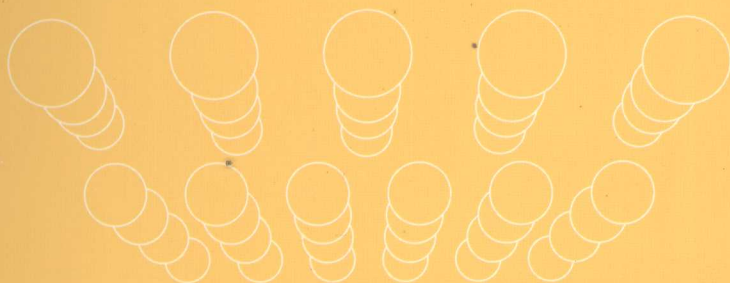




全国工程硕士专业学位教育指导委员会推荐教材

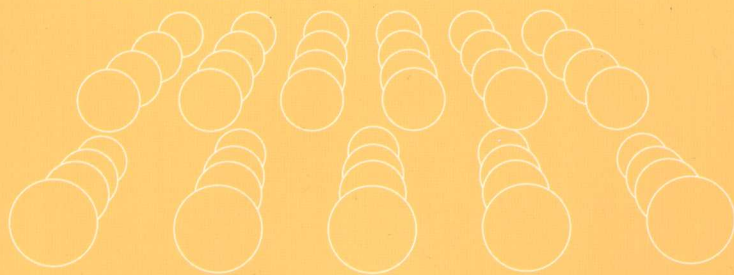
毛卫民 朱景川 郦剑 龙毅 范群成 著

Mao Weimin Zhu Jingchuan Li Jian Long Yi Fan Quncheng



金属材料结构与性能

The Structure and Properties
of Metallic Materials



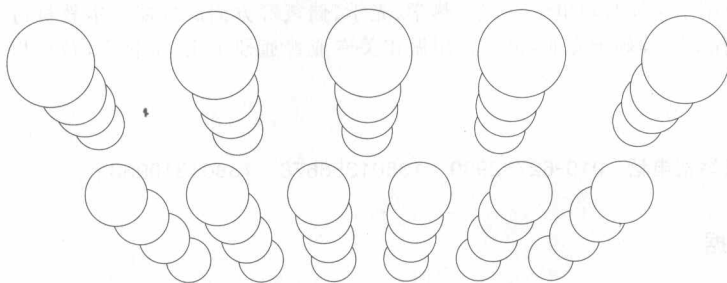
<http://www.tup.com.cn>

清华大学出版社

全国工程硕士专业学位教育指导委员会推荐教材

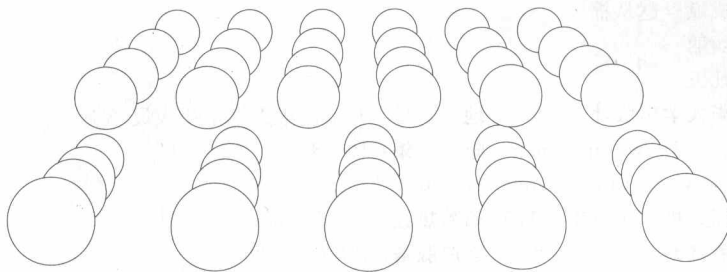
毛卫民 朱景川 郦剑 龙毅 范群成 著

Mao Weimin Zhu Jingchuan Li Jian Long Yi Fan Quncheng



金属材料结构与性能

The Structure and Properties
of Metallic Materials



清华大学出版社
北京

内 容 简 介

《金属材料结构与性能》是全国工程硕士研究生教育核心教材,主要用于相关专业工程硕士的专业基础课程教学,以便承接后续专业课。全书较为系统地介绍了金属晶体材料结构的基本知识,并简述了晶体结构检测方法,介绍了金属晶体中的点缺陷、位错、界面与表面等非完整结构。在材料力学性能方面,系统介绍了金属材料的力学性能实验、静载荷变形、强化、断裂和韧化、疲劳、蠕变等方面的知识。在材料物理性能方面,系统介绍了金属材料电学、磁学、热学、光学、储氢等方面的性能。本教材适用于金属材料、材料加工、冶金工程等工程硕士专业,也适合用做相关专业普通硕士生、本科生,乃至相关工程技术人员的专业参考书。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

图书在版编目(CIP)数据

金属材料结构与性能/毛卫民等著. —北京:清华大学出版社,2008.2

(全国工程硕士专业学位教育指导委员会推荐教材)

ISBN 978-7-302-16237-7

I. 金… II. 毛… III. 金属材料—结构性能—研究生—教材 IV. TG14

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 153470 号

责任编辑:宋成斌 赵从棉

责任校对:焦丽丽

责任印制:孟凡玉

出版发行:清华大学出版社 地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

<http://www.tup.com.cn> 邮 编:100084

c-service@tup.tsinghua.edu.cn

社总机:010-62770175 邮购热线:010-62786544

投稿咨询:010-62772015 客户服务:010-62776969

印刷者:北京四季青印刷厂

装订者:三河市新茂装订有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185×230 印 张:28.5 字 数:583 千字

版 次:2008年2月第1版 印 次:2008年2月第1次印刷

印 数:1~4000

定 价:55.00 元

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:(010)62770177 转 3103 产品编号:021162-01

前 言

《金属材料结构与性能》是经“全国工程硕士专业学位教育指导委员会”审批通过的全国工程硕士研究生教育核心教材,由北京科技大学、哈尔滨工业大学、西安交通大学、浙江大学等学校负责合作编写。《金属材料结构与性能》属于材料科学与工程学科领域的专业基础教材,是国内外材料专业硕士研究生的必修课程。《金属材料结构与性能》核心教材的参编单位在《材料的结构》、《工程材料力学性能》、《金属材料物理性能》等教材的编写方面具有丰富的经验和传统的优势,在工程硕士培养方面具有丰富的经验和成果。

随着教育体制的改革、材料学科专业面的拓宽及新材料技术的发展,各个学校在“金属材料结构与性能”的教学方面均面临着新的挑战,并从不同角度开始新的尝试和改革。随着我国材料工业的迅速发展和新材料产业的蓬勃兴起,大批已经从事多年技术工作的大学本科毕业生迫切需要通过工程硕士培养从专业角度继续深造,更新知识,以适应社会经济技术的发展。这些人员不仅直接来自材料学专业本科,而且来自“材料加工”、“冶金工程”、“机械制造”、“化学工程”等具有一定材料学基础知识的相近本科专业。对于这些不同“出身”的工程硕士生源,在设置上述教学课程时一方面需要扩展原金属材料专业在结构和性能方面的专业知识,同时也需要对相近专业的工程硕士生在专业基础课程方面进行较为系统的金属材料的结构与性能方面的基础教育。因此,非常有必要在各参编单位原有的工程硕士教学优势的基础之上编写一本“金属材料结构与性能”的核心教材,以满足国内金属材料工程硕士课程培养方面的迫切需求。

“金属材料结构与性能”课程是金属材料专业工程硕士进入专业课程教学的基础性课程。它将以金属材料的现实发展和工硕生源为背景,在原有基础之上适当拓宽金属材料结构、力学性能和物理性能的知识面,很好地承接后续专业课程的教学。

本次《金属材料结构与性能》核心教材较为系统地介绍了金属晶体材料结构的基本知识并简介了用X射线测量晶体结构的方法,介绍了金属晶体中的点缺陷、位错、界面与表面等非完整结构。在材料力学性能方面系统介绍了金属材料的力学性能实验、静载荷变形、强化、断裂和韧化、疲劳、蠕变等方面的知识。在材料物理性能方面系统介绍了金属材料电学、磁学、热学、光学、储氢等方面的性能。

本教材的编写以金属材料的现实发展和工程硕士研究生培养为背景,深化了原本科专业在金属材料结构与性能方面的教学内容。本教材在编写上注重材料工程的现实发展,增加了许多适应材料发展所需的新内容,尤其对功能材料发展所需要的物理性能的教学内容进行了重点充实。本教材把材料结构与性能的教学内容结合在一起,融会贯通,更加适应对具有实践经验的工程硕士研究生实施带有应用背景特点的培养;同时还注重材料结构、力学性能和物理性能三者之间相对的独立性,以便不同学校针对不同类型工程硕士培养时对教学内容有所取舍。本教材适用于来自“金属材料”以及“材料加工”、“冶金工程”、“机械制造”、“化学工程”等具有一定材料学基础知识的本科专业的工程硕士研究生;也适合用做相关专业普通硕士生、本科生,乃至相关工程技术人员的专业参考书。

《金属材料结构与性能》教材共分金属材料的结构、力学性能和物理性能三个部分,共16章内容。其中结构部分的第1、2、4章由北京科技大学毛卫民执笔,第3章由西安交通大学范群成执笔;范群成和浙江大学唐小明还参与了第1章部分内容的编写工作,北京科技大学余永宁、毛卫民对第3章内容作了补充。力学性能部分的第5~11章由哈尔滨工业大学朱景川负责编写。物理性能部分的第12章由浙江大学郦剑执笔,第13、14、15章由北京科技大学龙毅执笔,第16章由浙江大学陈立新、王新华执笔。材料结构部分由北京科技大学余永宁、董建新审稿,毛卫民负责统稿。力学性能部分由北京科技大学杨王玥审稿,由毛卫民统稿。物理性能部分由北京科技大学强文江和北京工业大学王从曾审稿,龙毅负责统稿。全书由毛卫民主持编写。作者借此感谢“全国工程硕士专业学位教育指导委员会”对本教材的指导和帮助,感谢清华大学出版社对本教材编写工作的资助。希望本教材能对我国材料工程专业工程硕士研究生的相关教学和科研有一定的帮助和推动作用。由于作者的认识水平有限,书中谬误在所难免,恳请读者给予指正。

编者

2007年3月

目 录

第 1 章 金属晶体与晶体结构	/1
1.1 晶体的基本特性	1
1.1.1 晶体的概念	1
1.1.2 晶体的基本共性	2
1.1.3 晶体的稳定性和不完整性	3
1.2 晶体的基本对称性	3
1.2.1 点对称操作	3
1.2.2 7 种晶系	6
1.2.3 平移对称操作	6
1.2.4 14 种布拉菲点阵	8
1.3 金属晶体的常见结构	12
1.3.1 单质晶体结构	12
1.3.2 AX 型化合物	15
1.3.3 AX ₂ 型化合物	17
1.3.4 AX ₃ 型化合物	19
1.3.5 结构转变及概率占位	22
1.3.6 拓扑密堆型化合物	23
1.4 晶体取向与多晶体织构	25
1.4.1 晶体取向	25
1.4.2 晶体学织构	27
1.4.3 取向分布函数的数学原理	29
1.4.4 织构的表达与定量分析	33
1.4.5 六方晶系与四方晶系的取向空间	35
1.5 金属晶体结构的 X 衍射分析简介	37
1.5.1 X 射线衍射的布拉格方程	37

1.5.2	X 射线衍射强度	39
1.5.3	X 射线衍射的结构因子	39
1.5.4	晶体点阵类型所引发的系统消光	41
1.5.5	多晶体极图的 X 射线测量原理	42
1.5.6	中子衍射结构分析	43

第 2 章 金属中的点缺陷 /45

2.1	点缺陷的热力学分析	46
2.1.1	点缺陷的基本热力学关系	46
2.1.2	空位浓度的测量	46
2.1.3	自间隙原子的产生	48
2.2	受辐照金属的点缺陷组态	50
2.2.1	自间隙原子与空位的组态	50
2.2.2	点缺陷的聚集和自组织	51
2.2.3	合金体系中持续点缺陷流引起的原子再分布	52
2.3	受辐照金属的回复与辐照损伤	53
2.3.1	辐照后的回复	53
2.3.2	辐照损伤	55

第 3 章 金属晶体中的线缺陷 /57

3.1	位错学说的产生	57
3.1.1	理论剪切强度的估算	57
3.1.2	位错理论的提出	59
3.2	位错的几何形态	60
3.2.1	位错的基本类型	60
3.2.2	柏氏回路及位错的柏氏矢量	64
3.2.3	位错的实验观察	68
3.2.4	位错的密度	70
3.3	位错的运动	70
3.3.1	位错的运动方向	71
3.3.2	位错的滑移运动	71
3.3.3	位错的攀移运动	71
3.3.4	位错的交滑移运动	72

3.3.5	位错运动的点阵阻力——PN力	73
3.3.6	位错运动与晶体的塑性变形	73
3.3.7	位错滑移造成的取向变化	74
3.4	位错的弹性性质	76
3.4.1	应力和应变分析	76
3.4.2	位错的应力场	78
3.4.3	位错的弹性应变能	81
3.4.4	作用在位错线上的力	83
3.5	位错与溶质原子的交互作用	88
3.5.1	位错与溶质原子的弹性交互作用	88
3.5.2	位错与溶质原子的静电交互作用	89
3.5.3	位错与溶质原子的化学交互作用	90
3.6	位错增殖与塞积	90
3.6.1	位错增殖	90
3.6.2	位错塞积群	91
3.7	实际晶体结构中的位错	93
3.7.1	全位错	93
3.7.2	不全位错	94
3.7.3	面心立方金属堆垛层错的类型	95
3.7.4	体心立方金属中的位错结构	101
3.7.5	有序合金中的位错	103

第4章 金属的面缺陷 /107

4.1	晶界的取向特征	108
4.1.1	晶界的空间几何特点	108
4.1.2	晶界取向差	108
4.1.3	多晶体晶界的取向差分布	111
4.1.4	平移界面及其取向特征	115
4.2	晶界的基本结构	116
4.2.1	小角度晶界结构	117
4.2.2	小角度晶界能量	120
4.2.3	大角度晶界结构与重合位置点阵	121
4.2.4	大角度晶界能量	125
4.2.5	晶界的平衡偏析	126

4.3	晶界的迁移特征	128
4.3.1	小角度晶界的迁移率	129
4.3.2	大角度晶界的迁移率	131
4.3.3	晶界上偏聚的溶质对晶界迁移的拖曳	135
4.4	金属的表面	137
4.4.1	表面张力和表面能	137
4.4.2	表面的微观形貌	141
4.4.3	表面弛豫和重构	141
4.4.4	表面吸附与表面偏析	143
4.5	相界面	144
4.5.1	相界面的基本特征	144
4.5.2	界面的平衡形貌	147
第5章 金属静载力学性能试验		/151
5.1	静载拉伸性能指标	151
5.1.1	拉伸试验与拉伸曲线	151
5.1.2	比例极限	152
5.1.3	弹性极限	153
5.1.4	弹性比功	154
5.1.5	屈服强度	154
5.1.6	抗拉强度	155
5.1.7	延伸率和断面收缩率	155
5.2	拉伸真实应力-应变曲线	156
5.2.1	真实应力-应变曲线与工程应力-应变曲线的比较	156
5.2.2	金属塑性变形的加工硬化	157
5.2.3	金属的加工硬化指数与成形性	158
5.3	其他静载力学性能试验方法	159
5.3.1	压缩试验	159
5.3.2	弯曲试验	160
5.3.3	扭转试验	161
第6章 金属静载变形行为		/164
6.1	弹性变形物理本质	164

6.1.1	弹性变形现象及其特点	164
6.1.2	胡克定律	165
6.1.3	弹性变形的物理本质	166
6.2	弹性常数	167
6.2.1	弹性常数的工程意义	167
6.2.2	影响弹性模量的因素	169
6.3	弹性不完整性与内耗	171
6.3.1	弹性后效	171
6.3.2	循环韧性	172
6.4	金属的塑性变形及其微观机制	173
6.4.1	金属的塑性变形及其特点	173
6.4.2	金属的塑性变形微观机制	175
6.4.3	材料塑性的工程意义	177

第7章 金属强度与强化理论 /178

7.1	金属强度的本质与构成	178
7.1.1	点阵阻力	179
7.1.2	位错间的交互作用阻力	179
7.1.3	金属屈服强度的本质及构成	180
7.1.4	金属强化的一般途径	180
7.2	金属的细化晶粒强化	181
7.2.1	多晶体的屈服强度	181
7.2.2	Hall-Petch 公式	181
7.2.3	细化晶粒强化的基本规律	182
7.3	金属的固溶强化	183
7.3.1	固溶强化现象	183
7.3.2	固溶强化机理	184
7.4	金属的第二相强化	185
7.4.1	分散型第二相的强化	186
7.4.2	集聚型第二相的强化	187
7.5	金属的形变强化	188
7.5.1	单晶体的形变强化	189
7.5.2	多晶体的形变强化	189
7.5.3	影响形变强化的因素	190

7.5.4	各种基本强化机制的耦合效应	193
第8章 金属的断裂与韧化 /194		
8.1	金属韧性断裂	195
8.1.1	纯剪切型断裂	195
8.1.2	微孔聚集型断裂	195
8.2	金属脆性断裂	200
8.2.1	解理断裂	200
8.2.2	沿晶断裂	204
8.3	金属脆化因素与脆化机制	205
8.3.1	缺口脆性	205
8.3.2	冲击脆性	210
8.3.3	低温脆性	214
8.3.4	金属韧化机制	216
第9章 金属裂纹体的断裂与断裂韧性 /219		
9.1	格里菲斯理论	219
9.1.1	理论断裂强度	219
9.1.2	格里菲斯断裂理论	220
9.2	线弹性断裂力学的基本原理	222
9.2.1	裂纹尖端的应力场及其强度因子 K_I	223
9.2.2	断裂韧性和脆断判据	225
9.2.3	裂纹尖端塑性区及其修正	226
9.2.4	裂纹扩展能量释放率	228
9.2.5	弹塑性状态的断裂判据——COD 和 J 积分简介	229
9.3	断裂韧性测试与应用	231
9.3.1	试样制备	231
9.3.2	测试方法	231
9.3.3	试验结果的处理	233
9.3.4	断裂韧性的应用	234
第10章 金属的疲劳 /236		
10.1	金属机械疲劳现象	236

10.1.1	循环应力	236
10.1.2	疲劳断口特征	237
10.2	疲劳强度与疲劳寿命	237
10.2.1	高周疲劳	238
10.2.2	低周疲劳	241
10.3	疲劳损伤理论及疲劳性能的提高	243
10.3.1	疲劳裂纹的萌生	243
10.3.2	疲劳裂纹的扩展	246
10.3.3	疲劳裂纹扩展速率	247
10.3.4	提高疲劳性能的途径	248

第 11 章 金属的蠕变与应力松弛 /251

11.1	热-力耦合变形及其时间效应	251
11.1.1	热-力耦合变形过程	251
11.1.2	载荷的时间效应	252
11.2	蠕变机理与应力松弛	253
11.2.1	金属的蠕变现象	253
11.2.2	蠕变机制	254
11.2.3	蠕变断裂过程	256
11.2.4	金属的应力松弛	257
11.3	蠕变抗力指标与影响因素	258
11.3.1	蠕变抗力指标	258
11.3.2	蠕变抗力影响因素	260

第 12 章 金属材料的电学性能 /262

12.1	金属材料的电学基本理论	262
12.1.1	经典自由电子论	262
12.1.2	晶体能带理论	263
12.1.3	导体与非导体能带	266
12.2	金属材料的基本导电性能	268
12.2.1	电阻 电阻率 电导率	268
12.2.2	电学性能与微观结构之间的关系	270
12.3	半导体的导电特性	277

12.3.1	半导体导电特性概述	277
12.3.2	本征半导体的导电性	277
12.3.3	非本征半导体的导电性	280
12.3.4	半导体导电特性小结	282
12.4	金属材料的热电效应	283
12.4.1	塞贝克效应	283
12.4.2	帕耳帖效应	284
12.4.3	汤姆孙效应	285
12.4.4	热电效应的应用——热电偶	285
12.5	金属的超导原理	286
12.5.1	超导体的基本性质	286
12.5.2	BCS 理论	288
12.5.3	两类超导体的基本特征	288
12.5.4	超导隧道效应	289
12.5.5	超导材料的发展	290
12.5.6	超导材料的应用	291
第 13 章 材料的磁性能		292
13.1	材料磁性概述	292
13.1.1	基本磁学量	292
13.1.2	磁性系统的单位	295
13.1.3	材料的抗磁性和顺磁性	296
13.2	磁性起源和原子磁矩	297
13.2.1	自由原子的磁矩	297
13.2.2	材料中的原子磁矩	300
13.3	自发磁化理论	303
13.3.1	铁磁性材料的宏观特征	303
13.3.2	外斯分子场理论	304
13.3.3	直接交换作用	305
13.3.4	稀土金属化合物中的间接交换作用	306
13.3.5	亚铁磁性“分子场”理论	307
13.3.6	亚铁磁性材料	310
13.3.7	反铁磁性和亚铁磁性的超交换作用	311
13.4	磁各向异性,磁致伸缩和退磁场	312

13.4.1	磁晶各向异性能	312
13.4.2	磁致伸缩	314
13.4.3	退磁场能	316
13.5	磁畴	318
13.5.1	磁畴壁	318
13.5.2	磁畴	320
13.5.3	不均匀和多晶体磁畴结构	322
13.5.4	单畴结构	322
13.6	磁性材料的技术磁化	323
13.6.1	技术磁化和反磁化过程	323
13.6.2	磁化曲线上的磁导率	327
13.6.3	磁滞回线上的矫顽力	330
13.6.4	剩余磁化强度	332
13.6.5	趋近饱和定律	333
13.7	铁磁性材料在交变磁场中的磁化	334
13.7.1	动态磁化过程的特点和复数磁导率	334
13.7.2	磁谱和截止频率	335
13.7.3	铁磁体的交流损耗	336
13.8	磁性测量方法	343
13.8.1	磁性材料直流特性测量	343
13.8.2	材料的交流(动态)磁性测量	347
13.9	磁电阻效应	349
第 14 章 材料的光学性质 /353		
14.1	光的基本性质	353
14.1.1	波粒二象性	353
14.1.2	光的波动性	355
14.1.3	光子的能量和动量	357
14.1.4	材料光学常数间的基本关系	358
14.2	光在材料中传播	359
14.2.1	光通过材料的现象	359
14.2.2	光在材料中的折射和反射	360
14.2.3	材料的透光性能	368
14.3	材料的光发射	374

14.3.1	激励方式	375
14.3.2	材料发光的基本性质	375
14.3.3	材料的发光过程	378
14.3.4	受激辐射和自发辐射	381
14.3.5	产生激光的条件	382
14.3.6	半导体激光	385

第 15 章 材料的热学性能和晶格振动 /390

15.1	晶格振动	391
15.1.1	一维单原子振动	391
15.1.2	一维复式格子的情形	394
15.1.3	声学波和光学波	395
15.1.4	周期性边界条件	397
15.1.5	晶格振动的量子化声子	399
15.2	材料的热容	401
15.2.1	电子热容	401
15.2.2	晶格振动热容	402
15.2.3	德拜温度和熔点的关系	407
15.2.4	热容与材料的组织、状态的关系	407
15.2.5	差示扫描热分析	409
15.3	材料的热膨胀	410
15.3.1	热膨胀系数	410
15.3.2	热膨胀的物理本质	411
15.3.3	热膨胀系数与其他物理量之间的关系	412
15.3.4	影响热膨胀系数的因素	413
15.3.5	膨胀合金	415
15.4	材料的导热性	418
15.4.1	材料的热传导	418
15.4.2	热传导的微观机制	419

第 16 章 金属的储氢性能 /423

16.1	储氢金属的基本特征	423
16.1.1	金属储氢的基本原理	423

16.1.2	储氢金属的分类	424
16.2	储氢金属的热力学与动力学特性	426
16.2.1	储氢金属的热力学特性	426
16.2.2	储氢金属的动力学特性	429
16.3	储氢金属的储氢结构与性能	430
16.3.1	常规储氢结构	430
16.3.2	AB ₅ 型晶体的储氢结构与性能	431
16.3.3	镁基储氢合金的结构和性能	433
16.3.4	Laves 相的储氢结构与性能	434
16.3.5	其他储氢合金	435

参考文献

/436

第 1 章

金属晶体与晶体结构

从广义上讲,用以制造有用物件的物质称为材料。在元素周期表中有 70 多种元素属于金属,因此金属是应用极为广泛的工程材料。

1.1 晶体的基本特性

1.1.1 晶体的概念

在人们发现了 X 射线之后,1912 年德国科学家劳厄用 X 射线作光源,用晶体作光栅进行照射实验,发现了 X 射线在晶体中的衍射现象,进而间接证明了晶体中的原子或分子呈现规则排列的特征。运用现代高分辨率电子显微技术还可以直接观察到晶体中原子的规则排列。图 1.1 是用高分辨率电子显微镜观察到的铝晶体中原子规则排列的情况。铝原子在晶体结构中的规则排列表现为,铝原子沿空间三个方向作特定平移后又可以移到附近另一个铝原子的位置,而且这种平移可以持续不变地重复下去并可以用某种平移的周期性来描述。铝原子的周期性平移可以用图中右上角所示单元体的平移表达,单元体持续平移后可以构建出铝晶体的有序结构。一般来说,晶体的单元体可由原子或原子团构成。

长期的研究表明,由原子或原子团构成的单元体进行三维长程有序排列而构成的一切固体物质都是**晶体**。晶体与非晶体之间的主要差别在于它们是否有三维长程有序的原子结构。晶体的物理性质、化学性质、几何形态等各种性质都与其内部长程的周期性结构紧密相连。