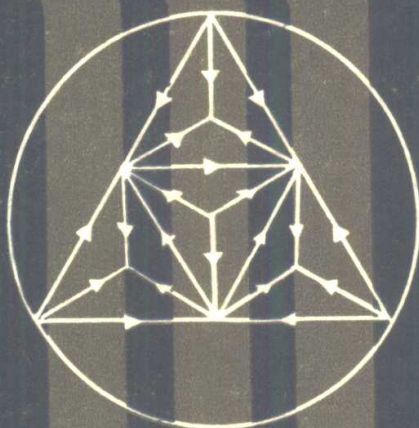


金属力学性质 的微观理论

哈宽富 编著



科学出版社

金属力学性质的微观理论

哈宽富 编著

科学出版社

1983

内 容 简 介

本书从微观结构出发,研究金属力学性质的本质,除弹性形变以外全书共分十五章。前三章介绍有关范性形变,位错,晶界与相界的一些基础知识。以后各章尽量按照从小形变到大形变,从简单形变到复杂形变,从单晶到多晶的次序,阐述金属及其合金的滞弹性、范性形变、加工硬化、屈服现象、退火、蠕变、疲劳、断裂等内容。有关次要内容同较烦琐的数学推导均列为附录。

本书可作为大专院校有关师生的参考书,也可供从事金属研究工作的科技人员参考。

金属力学性质的微观理论

哈宽富 编著

责任编辑 李义发

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1983年8月第 一 版	开本: 850×1168 1/32
1983年8月第一次印刷	印张: 22 5/8
印数: 精 1—3,790	插页: 精 3 平 2
平 1—3,100	字数: 576,000

统一书号: 13031·2311

本社书号: 3164·13—3

定 价: 布脊精装 4.90 元
平 装 4.20 元

序 言

金属力学性质的研究历来包括两个部分：一是建立它的数学处理方法；二是从微观结构出发，研究金属力学性质的本质。本书的内容属于后者，并对如何改进这些性质指出一些可行途径。

十九世纪末，X射线的发现为研究金属结构提供了新的手段，但在相当长一个时期内，人们对金属力学参量的计算，无论屈服强度或是断裂强度，仍然无能为力。相反，对一些物理参量却可以准确地计算出来。例如比热可以根据固体振动的量子统计理论计算出来，杨氏模量可以在金属电子论的基础上根据金属的晶体结构计算出来；而且所得结果与实验相当吻合。这种情况说明了金属的力学参量有别于物理参量。这一问题直到查明了前者是结构敏感量，后者是非结构敏感量才得到了澄清（所谓结构敏感量是指对同一种材料，采用不同试样测量某一物理量时，其重复性不好，反之称为非结构敏感量。当然，这两个概念之间并无一截然的严格分界线，力学参量主要强调其结构敏感性而已）。

由于金属的力学性质是结构敏感的，因此逐渐引起人们深入研究金属结构的非完整性，但直到位错理论问世，金属力学性质问题才开始得到解决。为此在讲述金属的力学性质之前，作者比较详细地介绍了位错理论的基础知识，因为在一定层次上，金属的力学性质可以说原则上取决于位错的多少、分布和运动以及与其他晶格缺陷间的相互作用。

本书讲述的微观理论只限于晶格尺度，因而把各种弹性系数，界面能以及层错能等都姑且看作物质常数。当然，我们知道，目前已有很多实验事实揭露出金属力学性质与其电子结构有关，但要形成某种成熟的理论，还需作更多的研究。

在过去很长一个时期，由于理论上的兴趣和在工程上盲目追求强度而形成的压力，使金属力学性质的研究主要集中在强度问

题上。但在生产实践中却出现了不少低应力脆断事故或整体屈服后的失稳断裂现象。因此，使人们对断裂这一概念又重新重视起来，本书专用一章讨论这个问题。最近人们对各种断裂参量的微观实质进行了不少探讨，但要对断裂的全过程有一明确认识，还需要深入研究断裂的物理机理。

本书前三章介绍基础知识，以后各章力求按照从单晶到多晶，从简单形变到复杂形变的次序依次叙述，并把临界切应力与流变应力分为两章（第五、六章）讲述，这只是一种尝试，是否合适，尚有待于实践检验。

由于金属晶体的典型结构只有 f. c. c.，b. c. c.，h. c. p. 三种，作者尽量采用恰当的材料使每一个问题都能结合这三种典型结构来讲解，以增强我们对金属力学性质的认识。此外，有一些很重要的领域，由于比较专门，未能包括在本书中，例如，辐照、振动、稀土元素等对金属力学性质的影响，非晶态和超纯金属的力学性质以及各种特种加工成型的金属力学性质的研究，其中包括粉末冶金制件，铸件和各种复合材料等。有关的实验技术问题，本书也没有谈到。

为了使读者能够在不查阅太多文献的前提下顺利阅读本书，在叙述过程中，作者尽量做到了先介绍实验事实，后讲述有关理论，而在介绍理论的同时也尽量做到结合实验，并不追求逻辑上的严格性与系统的完整性。此外，为了保持物理概念的连续性，特将一些公式的繁琐推导及有关的次要内容都编排在附录中，读者可以根据需要查阅这些附录。

本书在编写过程中，得到了钱临照、柯俊、冯端等先生的鼓励和帮助；特别是沈阳金属研究所师昌绪、刘民治、孔庆平、李有柯、高子明、苛伟、巴图、杨奇斌、潘正良、张弗天等同志对本书作了认真、深入、全面的审阅，提出了很多宝贵意见和建议，为本书的出版付出了辛勤劳动，在此一并表示衷心谢意。

由于作者水平有限，书中难免会有错误和不妥之处，请读者批评指正。

哈宽富

目 录

第一章 金属单晶范性形变的基本特点	1
§ 1.1 力学性质的各向异性	1
§ 1.2 形变的不均匀性	2
§ 1.3 滑移线的形成	5
§ 1.4 Schmid 定律	7
§ 1.5 温度对六方结构金属基面滑移临界切应力的影响	9
参考文献	9
第二章 位错理论基础	10
§ 2.1 什么叫做位错	10
2.1.1 理论切变强度的估计	10
2.1.2 位错概念的引入	12
§ 2.2 位错的原子模型及其几何性质	13
2.2.1 刃型位错、螺型位错与混合型位错	14
2.2.2 位错的普遍定义与柏氏矢量	18
§ 2.3 位错的运动与晶体的范性形变	21
§ 2.4 晶体中两种常见的位错形态	23
2.4.1 位错环	23
2.4.2 位错偶	24
§ 2.5 位错与应力场	26
2.5.1 刃型位错的应力场	26
2.5.2 螺型位错的应力场	27
2.5.3 位错的能量	27
2.5.4 位错的线张力	28
2.5.5 位错在外应力场中所受的力	29

§ 2.6 位错与位错间的相互作用	31
2.6.1 在平行滑移面上平行位错间的弹性相互作用	31
2.6.2 在同一滑移面上平行位错间的弹性相互作用—— 位错的塞积群	33
2.6.3 相交位错间的弹性相互作用	35
2.6.4 会合位错	35
2.6.5 割阶	36
§ 2.7 典型结构金属中的位错	37
2.7.1 位错的点阵模型	38
2.7.2 堆垛层错	39
2.7.3 部分位错	44
2.7.4 部分位错的柏氏矢量	48
§ 2.8 扩展位错	49
2.8.1 位错反应	50
2.8.2 Thompson 符号	51
2.8.3 面心立方结构中的扩展位错	52
2.8.4 面角位错的形成	58
2.8.5 位错网络的形成	59
2.8.6 扩展割阶	61
2.8.7 扩展位错的攀移	62
§ 2.9 位错的动力学性质	64
2.9.1 位错滑移的动力学	64
2.9.2 位错滑移的极限速度	66
2.9.3 位错线的振动	67
2.9.4 位错攀移的动力学	68
2.9.5 位错的增殖机制	73
§ 2.10 位错与点缺陷间的相互作用	76
2.10.1 位错与溶质原子的弹性相互作用	76
2.10.2 位错与溶质原子的静电相互作用	81
2.10.3 位错与溶质原子的化学相互作用	82
2.10.4 位错与有序分布的溶质原子间的相互作用	84
2.10.5 位错与空位同间隙原子间的相互作用	85

§ 2.11	位错心	90
§ 2.12	镜像力	91
附录 I .1	弹性力学的基础知识	92
附录 I .2	位错的应力场	103
附录 I .3	位错在外应力场中所受的力	107
附录 I .4	位错的点阵模型	109
附录 I .5	六方结构和体心立方结构中的层 错与部分位错	113
附录 I .6	扩展位错平衡宽度的计算	121
附录 I .7	六方结构和体心立方结构中位错的扩展	121
附录 I .8	位错滑移的极限速度	125
附录 I .9	Cottrell 气团	127
附录 I .10	Snoek 气团	129
附录 I .11	Suzuki 气团	131
附录 I .12	面心立方晶体中空位集聚成位错 的过程	133
参考文献		135
第三章	晶界与相界	139
§ 3.1	晶界概述	139
§ 3.2	小角晶界的位错模型	141
§ 3.3	几种大角晶界模型	144
3.3.1	相符点阵模型	144
3.3.2	平面匹配模型	152
3.3.3	旋错模型	152
§ 3.4	晶界能	155
§ 3.5	晶界的运动	158
3.5.1	晶界的滑动	159
3.5.2	晶界的移动	161
3.5.3	杂质对晶界运动的影响	164
§ 3.6	晶体的嵌镶结构	167

§ 3.7 相界	168
3.7.1 相分布	169
3.7.2 相界的位错模型	171
3.7.3 相界能	173
§ 3.8 晶界与相界对力学性质的影响	174
附录 III.1 Amelinckx 法验证晶界的位错模型	177
附录 III.2 Frank 公式	179
附录 III.3 晶界能的测量	180
附录 III.4 晶界移动的 Mott 理论	182
附录 III.5 第二相对晶界移动的作用	184
参考文献	185
第四章 滞弹性	187
§ 4.1 滞弹性概述	187
§ 4.2 内耗及其唯象处理	190
4.2.1 内耗与模量亏损	190
4.2.2 滞弹性型内耗	192
4.2.3 其它型内耗	197
§ 4.3 应力感生有序内耗	198
4.3.1 间隙式固溶体的感生有序	199
4.3.2 置换式固溶体的感生有序	201
§ 4.4 位错内耗	202
4.4.1 低温位错弛豫型内耗	202
4.4.2 位错钉扎内耗	207
4.4.3 位错内耗的气团模型	212
§ 4.5 界面内耗	214
附录 IV.1 Snoek 峰中弛豫强度 Δ_E 的计算	216
附录 IV.2 位错临界凸起形成能的计算	218
附录 IV.3 K-G-L 理论中 Δ_I 和 Δ_H 的计算	220
附录 IV.4 位错内耗的气团模型	222
参考文献	224

第五章 金属的起始范性形变	226
§ 5.1 概述	226
§ 5.2 临界切应力的理论估计	227
5.2.1 派-纳力	228
5.2.2 位错的长程弹性相互作用	229
5.2.3 会合位错的作用	229
5.2.4 与林位错交截产生割阶的作用	231
5.2.5 扩展割阶运动的作用	232
§ 5.3 临界切应力与温度的关系	233
§ 5.4 Schmid 定律的失败	236
§ 5.5 微范性	240
参考文献	244
第六章 金属的流变应力	245
§ 6.1 Cottrell-Stokes 定律	245
§ 6.2 Seeger 理论	248
§ 6.3 形变温度对流变应力的影响	253
§ 6.4 位错滑移的热激活参量分析	255
§ 6.5 热激活参量与流变机制	260
参考文献	264
第七章 金属晶体的形变与加工硬化	265
§ 7.1 滑移几何学	265
§ 7.2 面心立方结构金属晶体的形变	267
§ 7.3 六方结构金属晶体的形变	272
§ 7.4 体心立方结构金属晶体的形变	275
§ 7.5 形变状态的稳定性与潜在硬化	277
§ 7.6 滑移带	279
§ 7.7 加工硬化理论	280
7.7.1 林位错理论	281
7.7.2 割阶理论	282
7.7.3 Hirsch 理论	283

7.7.4 Seeger 理论	286
§ 7.8 形变软化	293
附录 VII.1 $\sigma-\gamma$ 曲线和 $\tau-\varepsilon$ 曲线换算关系的推导	295
附录 VII.2 Hirsch 理论中, 滑移线受阻条件 $2L^2RN=1$ 的推导	297
附录 VII.3 加工硬化问题的进一步讨论	298
参考文献	301
第八章 金属晶体范性形变的其它形式	304
§ 8.1 孪晶几何学	305
§ 8.2 六方结构金属中的孪晶	307
§ 8.3 面心立方结构金属中的孪晶	308
§ 8.4 体心立方结构金属中的孪晶	311
§ 8.5 孪生的一般特点	313
§ 8.6 孪生的位错机制	314
§ 8.7 扭折带	316
§ 8.8 二次滑移带	319
参考文献	320
第九章 多晶体的范性形变	321
§ 9.1 多晶体范性形变的一般特点	321
§ 9.2 双晶的拉伸形变	323
§ 9.3 多晶体的拉伸形变	324
§ 9.4 晶粒大小与形变的不均匀性	325
§ 9.5 多晶体形变理论	327
§ 9.6 组织结构对多晶体力学性质的影响	329
§ 9.7 形变织构	331
9.7.1 纤维织构	331
9.7.2 辗延织构	333
9.7.3 织构理论	335
§ 9.8 双相合金的形变	336
§ 9.9 复合材料	337

§ 9.10 残余内应力	341
附录 K.1 范性形变后能量的吸收	343
参考文献	345
第十章 合金的强化	346
§ 10.1 均匀强化	349
10.1.1 Mott-Nabarro 理论	350
10.1.2 Fleischer 理论	353
10.1.3 Feltham 理论	357
§ 10.2 非均匀强化	360
10.2.1 浓度梯度强化	360
10.2.2 Cottrell 气团强化	361
10.2.3 Snoek 气团强化	362
10.2.4 静电相互作用强化	362
10.2.5 化学相互作用强化	362
10.2.6 有序强化	363
§ 10.3 多重因素强化	366
§ 10.4 固溶合金临界切应力与温度的关系	367
§ 10.5 固溶合金的形变与加工硬化	370
§ 10.6 合金软化	374
§ 10.7 固溶强化与原子结构	375
§ 10.8 弥散强化合金的形变与加工硬化	379
§ 10.9 弥散合金的强化理论	383
10.9.1 Mott-Nabarro 理论	383
10.9.2 Kelly-Fine 理论	384
10.9.3 Orowan 理论	386
10.9.4 Ansell-Lenel 理论	387
10.9.5 弥散强化理论的验证	388
§ 10.10 弥散合金的屈服应力与温度的关系	392
§ 10.11 弥散合金的加工硬化理论	395
10.11.1 Fisher, Hart 和 Pry 理论	395
10.11.2 Ashby 理论	396

§ 10.12 弥散强化小结	400
§ 10.13 界面强化	401
附录 X.1 稀固溶体强化理论概要	403
附录 X.2 合金中的原子键	404
附录 X.3 时效动力学	407
附录 X.4 激活能 $U = U_0 \left(1 - \frac{\tau}{\tau_0} \right)^{3/2}$ 关系的推导	409
参考文献	410
第十一章 屈服现象	415
§ 11.1 非均匀屈服	416
11.1.1 Lüders 应变	417
11.1.2 非均匀屈服理论	420
§ 11.2 均匀屈服	422
11.2.1 均匀屈服的物理实质	422
11.2.2 均匀屈服理论	423
§ 11.3 迟屈服现象	427
§ 11.4 Hall-Petch 公式	429
§ 11.5 晶格摩擦力 σ_i 和 Petch 斜率 k	431
§ 11.6 各种因素对屈服应力的影响	433
§ 11.7 屈服机制的进一步讨论	435
11.7.1 位错钉扎与屈服现象	435
11.7.2 屈服过程中的晶格摩擦力	439
§ 11.8 面心立方结构和六方结构金属中的 屈服现象	442
§ 11.9 小结	444
附录 XI.1 Hahn 对均匀屈服的计算	448
附录 XI.2 Fisher 的屈服理论	450
参考文献	451
第十二章 形变金属的退火	457
§ 12.1 回复的一般规律	458

§ 12.2	回复过程中物理性质的变化	461
§ 12.3	多边形成	465
§ 12.4	再结晶的一般规律	469
12.4.1	加工再结晶	470
12.4.2	聚合再结晶	474
12.4.3	二次再结晶	475
§ 12.5	再结晶动力学的形式理论	475
§ 12.6	成核、长大理论	477
12.6.1	成核理论	478
12.6.2	长大理论	481
§ 12.7	Bailey-Hirsch 再结晶理论	484
§ 12.8	合金元素或杂质对再结晶的影响	487
§ 12.9	再结晶织构	491
12.9.1	形成机制	491
12.9.2	力学性质	492
§ 12.10	热塑性	495
§ 12.11	小结	498
参考文献		501
第十三章 蠕变		506
§ 13.1	蠕变曲线	507
§ 13.2	蠕变过程中组织结构的变化	509
13.2.1	蠕变过程中的滑移带与扭折带	509
13.2.2	蠕变过程中的回复与再结晶	511
13.2.3	蠕变过程中的晶界运动与晶间微裂纹的形成	513
§ 13.3	蠕变激活能	515
§ 13.4	蠕变理论	517
13.4.1	低温蠕变理论	517
13.4.2	中温蠕变理论	519
13.4.3	高温蠕变理论	520
§ 13.5	第三阶段蠕变与断裂	528
13.5.1	应力和温度对裂纹形成的影响	529

13.5.2 裂纹的形成机制	530
§ 13.6 蠕变过程中的晶界滑动与晶内滑移	534
§ 13.7 微蠕变	538
§ 13.8 抗蠕变合金	539
13.8.1 提高蠕变阻力的各种可能机制	540
13.8.2 提高蠕变阻力的主要依据	543
§ 13.9 超塑性	544
参考文献	547
第十四章 疲劳	550
§ 14.1 疲劳极限	550
§ 14.2 Bauschinger 效应	553
§ 14.3 疲劳硬化	556
14.3.1 静态疲劳硬化	556
14.3.2 动态疲劳硬化	557
14.3.3 疲劳硬化的三个阶段	559
§ 14.4 疲劳过程中组织结构的变化	561
14.4.1 滑移带的特点	561
14.4.2 挤出和侵入	563
14.4.3 疲劳形变后的位错状态	565
§ 14.5 疲劳形变中的饱和现象	567
§ 14.6 疲劳裂纹的成核与长大	570
14.6.1 成核机制	571
14.6.2 长大机制	574
§ 14.7 疲劳理论	579
14.7.1 Orowan 唯象理论	580
14.7.2 Tomkins 范性钝化理论	583
§ 14.8 疲劳与蠕变的交互作用	585
§ 14.9 影响疲劳的各种因素	587
§ 14.10 热疲劳	596
参考文献	597
第十五章 断裂	601

§ 15.1	断裂的概述	601
§ 15.2	理论断裂强度的估计	603
§ 15.3	Griffith 理论	605
§ 15.4	断口分析	607
§ 15.5	断裂的应力条件	610
15.5.1	单晶断裂的应力条件	610
15.5.2	多晶断裂的应力条件	611
15.5.3	缺口对脆性的影响	613
§ 15.6	单晶的断裂	615
15.6.1	单晶中裂纹的成核与长大	615
15.6.2	单晶中裂纹的传播	616
§ 15.7	多晶的断裂	618
15.7.1	多晶中裂纹的成核、长大和传播	619
15.7.2	断裂应力与晶粒度	620
15.7.3	断裂应力与温度	621
15.7.4	沿晶断裂	622
§ 15.8	脆性断裂理论	623
15.8.1	Stroh 理论	624
15.8.2	Cottrell 理论	627
§ 15.9	裂纹的失稳扩展	630
§ 15.10	脆性转变现象	633
15.10.1	脆性转变温度的一般特点	634
15.10.2	脆性转变温度的有关理论	635
§ 15.11	脆性与金属的电子结构	637
§ 15.12	断裂韧性	640
§ 15.13	裂纹体的疲劳与蠕变	645
§ 15.14	氢脆	648
§ 15.15	应力腐蚀开裂	658
§ 15.16	裂纹的稳态扩展	662
15.16.1	Griffith 理论的重新评价	663
15.16.2	裂纹的稳态扩展现象及其力学参量	665

15.16.3	裂纹的稳态扩展机制	669
15.16.4	裂纹尖端地区的结构	680
15.16.5	蠕变条件下裂纹的稳态扩展	683
§ 15.17	延性断裂	685
15.17.1	单晶的延性断裂	686
15.17.2	多晶的延性断裂	687
15.17.3	延性断裂理论	690
参考文献		691
人名索引		697
名词索引		705