

GANG DE WULI YEJINXUE

钢的物理冶金学



W. C. 莱斯利 著 余宗森 谢善骅 译 冶金工业出版社

钢的物理冶金学

W.C.莱斯利 著
余宗森 谢善骅 译

冶金工业出版社

内容简介

本书是关于钢的物理冶金学的教学参考书。作者在书中系统地阐述了高纯铁、碳钢、低合金高强度钢、可热处理钢、超高强度钢、电磁用钢、不锈钢和工具钢的性能及其影响因素。对这些钢的热处理、热机械处理或表面硬化处理所用的工艺和所获得的组织，也作了相应的介绍。作者引用了大量近年来发表的参考文献，对各种学说和观点作了较全面的综述和评论。

本书可供材料科学和工程专业的大专院校高年级学生及研究生作教材，也可供从事金属材料、热处理科研生产的教师和工程技术人员作参考用书。

钢 的 物 理 冶 金 学

W.C. 莱斯利 著

余宗森 谢善骁 译

责任编辑 赵公台

*

冶 金 工 业 出 版 社 出 版

(北京北河沿大街嵩祝院北巷39号)

新华书店北京发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

*

850×1168 1/32 印张 12 7/8 字数 338 千字

1988年9月第一版 1988年9月第一次印刷

印数00,001~1,980册

ISBN 7-5024-0066-4

TG·9 定价 3.75 元

译 者 序

这是一本论述钢的物理冶金学的教学参考书,是美国麦格劳-希尔 (McGraw-Hill) 图书公司编选的麦格劳-希尔材料科学与工程丛书之一。

迄今为止,国外已出版了许多物理冶金学方面的专著,国内也已翻译和编写了不少同类书籍。与其他同类著作相比较,本书具有下列一些特点:其一是本书对钢铁材料的性能与它们的应用之间作了较好的联系;特别在热处理实践方面,本书以较多的篇幅进行阐述。本书的作者W.C.莱斯利教授在钢的物理冶金学的理论和实践方面都有很深的造诣,这可能与他曾经在工业界和科学界担任过许多职务的经历有关。其二是与一般教科书比较本书引用了较多的参考文献,其中多数是近年发表的。看来作者是力图通过本书来综合和反映世界上(主要是美国)知名物理冶金学家们的学说和观点。其三是在内容编排上,本书采用了由浅入深、从简到繁的安排,给阅读带来了方便。

本书作者W.C.莱斯利是一位知名的美国物理冶金学家,密西根大学材料工程系教授,发表过八十多篇有关金属研究的论文。本书是作者在他自己所用教材的基础上经补充和修改而写成的,可供大专院校材料科学和工程专业的师生作教材,也可供从事金属材料科研和生产的工程技术人员作参考用书。

本书作者曾于1964~1965年在美国俄亥俄州立大学冶金系任教。十五年后本书的两名译者先后到该系进修,1981年底当译者之一余宗森同志离校回国的时候,系主任P.G.舒曼(Shewmon)教授将这刚刚出版的新书赠给了他并希望他介绍到中国。在译完这本书并在中国出版的时候,译者谨向舒曼教授表示感谢。

本书第一章至第六章由余宗森翻译,第七章至第十三章由谢善骢翻译。全书由谢善骢校对。由于译者水平所限,谬误之处,恳请指正。

前 言

过去在大学生中讲授的物理冶金学，一般都至少分为两个独立的部分：黑色金属和有色金属。后来认识到了这种分法的不足之处，大多数学校开始把物理冶金作为一门统一的科目来讲授。对于入门的课程来说，这是最有效的方法；但是由于一些十分明显的理由，这种分法仍具有不足的地方：在工程材料中，钢具有头等重要的地位，而且体心立方金属的特性又十分特殊，因此，对于冶金工作者的恰当教育，需要开设单独讲授钢的课程。由于除铁、铝、镁、钛之外的金属矿趋于枯竭和储量少的金属变得日益昂贵，钢将变得甚至比现在还要重要，因而用尽可能少的合金化元素来取得最佳的性能也将变得十分重要。

本书可用作具有一定基础的大学生和一年级研究生的课程，讲授学时为一或两个学期（一学期为半年）。过去，钢的物理冶金课程强调的是由用户进行热处理的钢的特性，在很大程度上忽视了绝大多数并不进行这类处理的钢。本书的目的之一就是要弥补这种忽略。本书以物理化学、材料力学、位错和其他晶体缺陷以及固体中的相变等知识为基础，并企图将基础研究的结果应用于实际应用的工程材料中。虽然本书主要是供高等学校学生使用，但它对希望进一步了解钢性能的从事生产实践的工程师也应当是有用的。

在近二十年中，我们对体心立方金属及其为什么能具有现有功能的了解已大大扩展了，从而能比过去自信得多地来讲授其性能。为此，本书的安排是按照由简单到逐渐复杂的系统来进行讨论的，从高纯铁的性能开始，然后考虑加入间隙溶质原子、置换溶质原子的影响，铁中溶质之间的相互作用，碳钢、低合金高强度钢、可热处理钢的性能，热机械处理，超高强度钢和断裂的防止，表面硬化处理，电磁用钢，不锈钢以及工具钢。

有关钢物理冶金的文章已经有成千上万，因此尽管本书引用

的参考文献比一般教科书多，但显然仍不可能完全概括其全部文献。我从近年的文献中只引用了我们从前人那里学来也许有益的观点。这种作法意味着我对许多原著没有予以应有的评价。对于这些省略的作法，我是深感抱歉的。我所引用的文献将给读者提供一条找到相关文献的入门之路，使他们可以由此继续学习他们有兴趣的知识。

本书的原稿是1964~1965年我在俄亥俄州立大学 (Ohio State University)对研究生讲课用的一系列讲稿，那时我作为冶金学访问教授在巴特尔(Battelle)研究所工作。这些讲稿曾作过修改和补充，成为1973~1978年期间密西根大学(University of Michigan)的课堂教材。本书最后定稿是1971年1月至6月在墨尔本大学 (University of Melbourne)矿冶系度休假年期间，我感谢该系提供了办公室和设施，特别是N.西姆 (Sim) 女士准确地为我打印了底稿。密西根大学材料和冶金工程系的K.卡罗尔 (Carroll)女士完美地和令人愉快地完成了为多次修正和补充而打字的乏味工作。

我很感激我从前的同事：L.J.卡迪，H.胡，J.T.米凯拉克，P.R.莫尔德，G.R.斯佩奇，W.A.施皮策希和H.A.符里特等几位博士，他们对本书的部分内容作了审阅和给予其他的帮助。不管在本书中发现什么可取之处，多半是由于他们的努力；而其余不足之处则应由我自己负责。

W.C.莱斯利

目 录

第一章 高纯铁的性能	1
1-1 铁晶体的理想强度	1
1-2 体心立方铁的屈服和塑性流变	2
1-3 铁的应变硬化	5
1-4 机械孪生	12
1-5 形变织构	14
1-6 晶粒尺寸对屈服的影响	16
1-7 铁的屈服应力与温度和应变速率的关系	20
1-8 屈服的位错动力学理论	26
1-9 热激活流变	35
1-10 回复	37
1-11 再结晶	43
1-12 正常晶粒长大	58
1-13 退火织构	60
1-14 高纯铁中的相变	61
参考文献	66
第二章 α 铁中的间隙原子	70
2-1 间隙位置和间隙原子	70
2-2 内耗	72
2-3 间隙溶质的溶解度	75
2-4 间隙溶质的扩散率	80
2-5 静态应变时效	82
2-6 动态应变时效	91
2-7 间隙溶质的固溶强化和软化	96
2-8 间隙溶质对回复和再结晶的影响	97
2-9 从固溶体中沉淀(淬火时效)	98
2-10 磁时效	105

参考文献	110
第三章 α 铁中的置换溶质	112
3-1 溶质对点阵参数和弹性模量的影响	112
3-2 固溶强化及软化	117
3-3 置换溶质原子的静态应变时效	121
3-4 置换溶质原子的动态应变时效	122
3-5 置换溶质对铁韧性的影响	124
3-6 溶质在铁中的偏析	126
3-7 杂质对晶界迁移的影响	129
3-8 置换溶质从 α 铁中的沉淀	134
参考文献	135
第四章 铁中溶质原子的交互作用	137
4-1 化合物的生成	137
4-2 铁素体中置换和间隙溶质原子的交互作用	139
4-3 铁素体中不同置换原子间的交互作用	142
4-4 置换溶质对碳化铁沉淀的影响	142
参考文献	144
第五章 碳钢	145
5-1 低碳薄钢板钢	145
按脱氧操作分类的钢	145
影响碳钢屈服和抗拉强度的因素	151
表面光轧和不连续屈服的恢复	152
铝镇静低碳钢板的加工	153
深冲用钢板的 r 值及织构	155
钢板的应变硬化指数 n 与可延展性	158
低碳钢板的淬火时效	160
碳钢的应变时效	162
双相碳钢	166
搪瓷板	166
镀金属的压延产品	167
5-2 铁素体-珠光体钢	168
抗拉性能	168

韧性	169
晶粒尺寸控制	171
碳钢中的带状	177
性能的方向性	181
夹杂物形状的控制	183
硫对切削加工性能和疲劳寿命的影响	185
过热和过烧	185
拉丝、铅淬火和珠光体的加工硬化	186
冷成形	188
碳钢的超塑性	189
碳钢显微组织的控制	191
参考文献	193
第六章 低合金高强度钢	197
6-1 定义和钢号	197
6-2 低合金高强度 (HSLA) 钢的晶粒细化	198
6-3 低合金高强度钢的沉淀强化	202
6-4 控制轧制及控制冷却	208
6-5 针状铁素体钢	210
6-6 贝氏体钢	211
6-7 双相低合金高强度钢	213
6-8 脱硫、脱氧及夹杂物形状控制	215
6-9 耐大气腐蚀钢	218
参考文献	219
第七章 热处理钢	221
7-1 引言	221
7-2 马氏体的结构	221
7-3 马氏体的强度	227
7-4 强度差异效应	233
7-5 马氏体的回火	236
机制	236
回火后硬度的估算	243
7-6 回火时的脆性	247
7-7 淬透性	253

7-8 等温转变图	267
7-9 连续冷却转变图	276
7-10 淬透性带	277
7-11 硼的影响	281
参考文献	291
第八章 钢的热机械处理	295
参考文献	301
第九章 超高强度钢: 断裂的防止	302
9-1 标准合金钢的变质	302
9-2 高强度钢板钢	302
9-3 用作结构材料的工具钢	304
9-4 高强度渗碳钢	306
9-5 马氏体时效钢	307
9-6 TRIP钢	309
9-7 脆性断裂	309
9-8 延性断裂	314
9-9 影响断裂的冶金因素	314
参考文献	318
第十章 表面硬化处理	320
10-1 引言	320
10-2 渗碳	320
10-3 碳氮共渗	327
10-4 氮化	327
10-5 不改变钢成分的表面硬化处理	333
参考文献	334
第十一章 电磁用钢	335
参考文献	343
第十二章 不锈钢	344
12-1 引言	344
12-2 相图	344
12-3 单个添加剂对Fe-Cr-Ni合金的影响	348
12-4 Fe-Cr合金的脆性	354

12-5 奥氏体不锈钢的堆垛层错能	358
12-6 铁素体不锈钢	358
12-7 马氏体不锈钢	363
12-8 铁素体-奥氏体双相钢	367
12-9 奥氏体不锈钢	371
12-10 沉淀硬化不锈钢	374
参考文献	375
第十三章 工具钢	378
13-1 分类、成分和用途	378
13-2 热处理、奥氏体化和碳化物的溶解	386
13-3 奥氏体转变动力学	387
13-4 回火、碳化物沉淀和二次硬化	388
参考文献	393
附录	395

第一章 高纯铁的性能

1-1 铁晶体的理想强度

虽然在本书中我们主要关心的是钢的组织与性能之间的关系,但是,对这些关系的理解显然必须建立在对体心立方铁的性能了解的基础上,因为铁是组成钢的基本材料。首先让我们考虑铁的强度上限,即它的理想强度。这一强度是由原子间力的大小所决定的。铁的理想强度可借测定单个晶须的强度来获得^[1],或者用几种不同的近似计算方法求得。方法之一^[2]是把理想抗拉强度与杨氏模量 E 、平衡表面能 γ 和与外加应力垂直的平面的面间距 a_0 联系起来:

$$\sigma_{\max} = \left(\frac{E\gamma}{a_0} \right)^{1/2} \quad (1-1)$$

近似的理想切变强度可由富兰克尔 (Frenkel) 给出的关系式^[3]进行计算:

$$\tau_{\max} = \frac{Gb}{2\pi d} \quad (1-2)$$

式中 G ——切变模量

b ——切变方向上的重复距离

d ——切变平面的面间距

由于对固体中的键合力还不清楚,因此在计算中进行了回避。从原则上来说,基于原子间力模型的计算方法应比这种近似方法更为精确,但是由于我们缺乏对原子间力的了解,因此只考虑静点阵,并且不考虑空的点阵位置。米尔斯登 (Milstein)^[4]曾用莫尔斯 (Morse) 势函数代表铁的原子间力,试图计算 $\langle 100 \rangle$ 方向的单轴理想拉应力和压应力。

表1-1归纳了布伦纳 (Brenner) 的试验结果和凯利 (Kelly) 的简单计算。尽管计算值只能看作是数量级尺度的近似^[5],但

显然测量值及计算值出入不大。米尔斯登计算得到的理想抗拉强度小于测量所得铁的抗拉强度的十分之一，这大概可以说明莫尔斯势模型是不适用的。

我们所有的最强铁基工程材料是大拉拔量的珠光体钢丝，其抗拉强度可以接近4.8GPa。虽然必须立即指出，这一强度是借助不同于决定铁晶须强度的机制来达到的，但是在工程材料中我们总算是达到了大约等于铁的理想强度三分之一的强度。

表 1-1 计算和测量所得体心立方铁晶体理想强度的比较

位 向	应变 ($\sigma_{\max}/E$)	强度 (GPa)
a. 单轴抗拉强度$\sigma_{\max}$		
观测值 $\langle 111 \rangle$	0.049	13.1
观测值 $\langle 100 \rangle$	0.033	4.8
计算值 $\langle 111 \rangle$	0.23	46.0
计算值 $\langle 100 \rangle$	0.13	30.0
b. 切变强度$\tau_{\max}$		
观测值110 $\langle 111 \rangle$		3.58
计算值110 $\langle 111 \rangle$		6.6~7.8

1-2 体心立方铁的屈服和塑性流变

人们大量使用铁是因为它价格不贵，就其强度来说它比较软且易于变形。因此我们必须仔细研究铁的塑性变形。体心立方铁总是沿密排方向 $\langle 111 \rangle$ 滑移。最短的点阵矢量是由单胞角隅的原子连至中心的原子；故布氏矢量为 $(a/2)\langle 111 \rangle$ ，大小为0.248nm。一个刃型位错的滑移面由位错线及其布氏矢量所规定，因此刃型位错只在 $\{110\}$ 、 $\{112\}$ 、或者还有 $\{123\}$ 面上滑移^[6]。螺型位错线与布氏矢量是平行的，因而不能规定一个平面，这意味着螺型位错可在任何含有 $\langle 111 \rangle$ 方向的面上滑动，并且可以交滑移。在任一给定情况下所选择的滑移面大致是分切应力最大的平面。

高纯度的退火体心立方多晶铁基本不含有间隙溶质，在通常

试验机所用的应变速率和略低于室温时的拉伸流变曲线如图1-1所示。在单轴试验中当施加负荷时，铁首先发生弹性屈服，但其弹性变形量极其有限。弹性变形之后是屈服前的微应变，此时只在少数几个大致处于应力集中处的晶粒内的位错发生运动，随着应变的继续负荷会发生下降。试验机对含有少量运动位错的样品

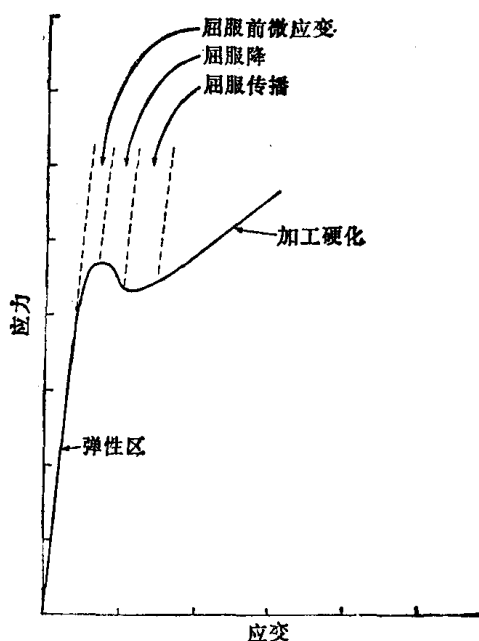


图 1-1 多晶体心立方铁在单轴拉伸时的典型流变曲线

大体施加一个恒定的应变速率。为了在样品中保持这一速率，负荷必须增加，这有两个作用：

1. 运动位错的密度借位错增殖而增加。
2. 平均位错速度急速增加。

在样品的有限范围内，局部应变速率超过了机器的速率，此时作用到样品上的负荷发生突然的下降。在此屈服传播的区域内，高度局部化的单个或多个变形带（Lüders带）从一个或数个源传播，直到这些带传遍整个标距区，然后开始均匀形变硬化。

许多年来都是假设间隙溶质 (C, N) 的存在是这种突然的和间断的屈服的前提, 而此屈服的发生是由于位错脱开钉扎。这一观念现已被放弃, 代之以后面还要谈到的位错动力学的解释。

近年来, 可以看到人们对图1-1流变曲线细节的理解有了显著的进展。在一给定应力下, 体心立方铁的刃型与螺型位错运动的难易程度是不同的。刃型位错在应力远低于宏观屈服应力时就易于运动, 它们的运动速率随应力的增加而迅速增加。萨加(Saka)和伊缪拉(Imura)^[7]用高压透射电子显微镜直接观察高纯Fe-3%Si合金, 得出下列刃型位错平均速度与外加切应力的关系:

$$\bar{v} = \left(\frac{\tau}{\tau_0} \right)^m \quad (1-3)$$

式中 τ ——滑移面上的分切应力

τ_0 ——相当于单位速度的切应力 = $157 \pm 5 \text{ MPa}$

m —— 35 ± 5

因此, 当应力施加到退火的高纯铁上时, 首先发生的流变是微观的。产生微观屈服所需的应力可分为两部分^[8]:

σ_E ——线性弹性行为结束(弹性限)而回线开始出现时的应力;

σ_A ——不可逆(塑性)形变所需的应力, 即滞后回线不能封闭时的应力, 这就是滞弹性限。

如图1-2所示, 弹性限 σ_E 表示刃型位错可逆运动所需的应力, 而滞弹性限 σ_A 是位错作长程不可逆运动所需的应力。这两个应力值是低的, 在室温下小于35MPa, 并随温度的降低只是略有增加。米金(Meakin)^[9]报导说铁的 σ_E 在室温时约为2MPa。它只能在没有间隙杂质钉扎住位错时才能测量出来, 而且对于退火铁来说要求应变测量的灵敏度约为 10^{-6} 才行。预先的塑性变形可以大大增加屈服前微应变的量, 因为塑性变形可以产生大量的可动位错。在这种情况下, 在应变灵敏度约为 10^{-5} 时就可以观察到微塑性。

当应力低于宏观屈服应力时，螺型位错的运动是不显著的。随应力增加，已经存在的刃型位错被消耗掉。宏观屈服取决于螺型位错的运动，螺型位错运动时伴随有位错的增殖，此增殖是凭借双交滑移机制来进行的。可以把宏观屈服应力一使塑性应变速率变成很高百分比的由试验机施加的应变速率下的应力看成是大量交滑移开始发生时的应力。对于铁和其它体心立方金属来说，此应力是由螺型位错运动所需要的应力所决定的。

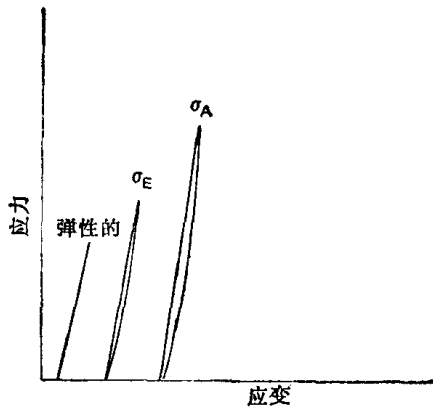


图 1-2 铁在微应变区的应力-应变曲线

1-3 铁的应变硬化

铁在冷加工时位错密度增加，在冷加工的开始阶段，位错密度与真应变成比例（图1-3）。对于一给定应变，细晶铁的位错密度高于粗晶铁的密度。铁的位错密度与流变应力的关系如图1-4所示。室温时的直线可表示为

$$\sigma = \sigma_0 + \alpha G b \sqrt{N} \quad (1-4)$$

式中 α ——比例常数

G ——切变模量

b ——布氏矢量的大小

N ——位错密度

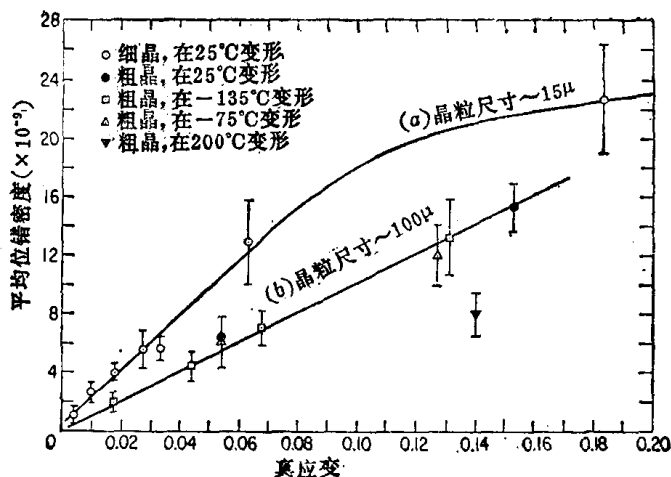


图 1-3 铁的平均位错密度与塑性应变的关系

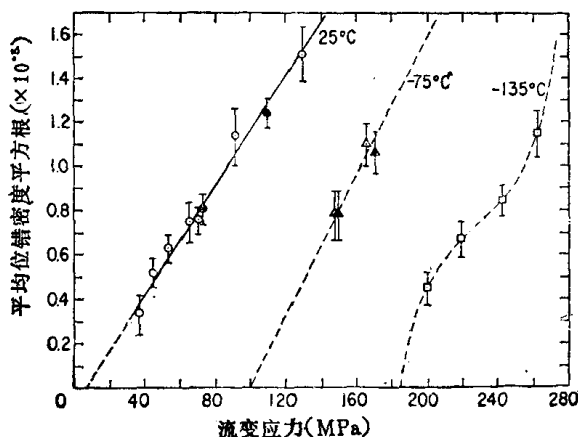


图 1-4 铁的平均位错密度的平方根与流变应力的关系

铁的加工硬化速率在室温附近为最大，在 -40° 至 -75°C 之间降为一最低值，温度进一步降低时此数值又复增加。

为了以简明的形式表示应力-应变关系，人们几乎毫无例外地都应用路德维克 (Ludwik)⁽¹¹⁾推导的经验方程：

$$\sigma = K \epsilon^n \quad (1-5)$$

式中 σ 是真流变应力、 ϵ 是真应变、 K 和 n 是常数。它只适用于