

[法] J.P. POIRIER

晶体的 高温塑性变形

关德林 译
张俊善 校

大连理工大学出版社

内 容 提 要

本书从唯象理论、经验关系及微观结构出发,系统论述了各种晶体高温塑性变形的宏观规律和物理机制,介绍了金属和合金、非金属化合物、塑性高分子及岩石的蠕变过程,分析了晶体材料的超塑性变形。讨论的内容涉及固体物理、固体力学、晶体学、物理冶金、地球物理等领域,构思严谨,深入浅出,联系实际。

本书对于从事材料科学与工程、金属加工、晶体材料的力学性质、地质学、地震学等方面的科研人员、工程技术人员及大专院校师生均有参考价值,也可作为研究生的教材。

J. P. POIRIER

Plasticité à haute température
des solides cristallins

本书根据EDITIONS EYROLLES, Paris, 1976年版翻译

晶体的高温塑性变形

Jingtí De Gāowēn Sùxíng Biànxíng

关德林 译 张俊善 校

大连理工大学出版社出版

辽宁省新华书店经销

(大连市凌水河)

朝阳新华印刷分厂印刷

开本: 850×1168 1/32 印张: 12 字数: 309千字

1989年11月第1版

1989年11月第1次印刷

印数: 0001—1000册

责任编辑: 方延明

封面设计: 葛明

责任校对: 杨春

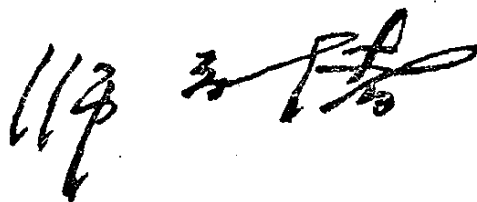
ISBN 7-5611-0156-2/TG·5

定价: 2.83元

序 言

高温塑性是材料的一种重要特征。一方面材料在压力加工过程中要求在高温下具有足够的塑性才能成型；另一方面材料在使用过程中要求对变形有足够抗力（表现为强度），但又要有有一定的塑性，否则就容易发生早期断裂或灾害性的破坏。抗力和塑性一般来说是难以调和的一对矛盾，要根据需要调整材料的结构，以满足设计的要求。《晶体的高温塑性变形》的翻译出版将有利于对材料抗力与塑性本质有一个更深入的了解。特别是在高温结构陶瓷和高温合金材料的研究迅猛发展的今天，高温塑性的研究有更大的意义。相信这本书的翻译出版对我国材料的发展和材料的合理使用将有推动作用。

关德林曾在中国科学院金属研究所从事高温合金的研究工作。在法国留学期间，获得博士学位，并受益于 J. P. Poirier 教授的教诲。可以说，这本书的翻译水平是比较高的。我为本书的翻译出版表示祝贺！



一九八八年三月

译 者 序

继日文版和俄文版之后，我高兴地将J. P. Poirier教授的《晶体的高温塑性变形》一书的中译本奉献给广大读者。

J. P. Poirier 先生是法国巴黎六大地球物理研究所的教授，早年从事金属蠕变研究，后来又开始了非金属化合物及岩石的高温塑性变形研究工作，《晶体的高温塑性变形》一书便是他多年工作的累积和总结。

本书从唯象理论、经验和半经验方法以及物理机制方面系统地论述和分析了各种晶体（金属、非金属、岩石等）的高温变形行为和理论，是一本杰出的专著，曾被日本科学厅列为物理学世界名著之一。本书对于从事物理学、材料科学和地质学等领域工作的教师、科研人员及工程技术人员无疑会有所帮助，也可作为研究生的教材或参考书籍。

我在法国学习期间曾涉猎于材料的高温变形领域，并多次受益于J. P. Poirier 先生的教诲，回国后适逢张俊善老师亦由日本工作归来，他在留日期间便多次通读并潜心研究了本书的日文版本，故欣然地承担了本书的校译工作。

大连海运学院金属材料工艺研究所名誉所长杨烈宇教授在百忙之中顾及本书的出版工作，亲阅书稿，我愿表示衷心的感谢。

原大连理工大学材料系主任曹智本教授生前曾热情地支持本书的出版工作，并提出许多宝贵意见，在此表示我深切的怀念。

铀铀在繁忙的工作之余用系统软件将全部书稿存入计算机，进行了浩繁而艰辛的工作，使我们能得心应手地修改，谨此表示诚挚的谢意。

此外，在本书的翻译整理过程中还得到了刘之敏、李远明、史雅琴、安楚、刘莎等同志的热情帮助，在此一并感谢。

由于译者水平所限，时间仓促，疏漏错误之处难免，恳请读者批评指正。

译者

一九八七年十二月

原 序

材料科学研究人员对晶体的高温变形产生愈来愈大的兴趣。其原因一方面是由于实际应用的需要, 另一方面显然是在高温塑性变形条件下几乎所有的晶体缺陷(点缺陷、位错、晶界等)都扮演重要的角色, 因而涉及极为丰富而有趣的基本问题。

然而, 在大学或工厂的实验室里, 无论是刚刚开始做论文的研究生还是训练有素的研究人员都对这一领域二十多年来大量的文献望洋兴叹, 而且这些文献的数量还在以指数的方式继续增长。

本书的目的便是向遨游在众多实验结果和各种学派理论迷宫中的从事高温塑性物理研究的人提供一条阿莉阿德尼绳索^①, 有了它, 走出迷宫唯一所需的知识是对位错和固态扩散的基本了解。

与一本完整的文献总结不同, 本书力图列举突出的实验事实, 比较和评述研究人员经常碰到的主要理论, 并指出那些至今尚知晓甚少或理解不深的地方。

我一直想把通常是相互矛盾而又十分冗长的材料加以整理和组织起来, 这是毫不犹豫地决心执笔本书的原因, 尽管这可能带来某些非难。此外, 还存在一个更大的风险便是在总结过程中可能会非本意地曲解了某个作者的思想, 我愿在此事先向那些可能的受害者表示我的歉意。

原子能委员会物理冶金研究室为我编写这本书提供了一个舒适而令人亢奋的环境, 领导该研究室的 M. Y. Adda 先生前不

^①希腊神话中阿莉阿德尼(Ariane)用小线团帮助提修斯逃出迷宫——译注。

久使我对蠕变发生了兴趣，并且鼓励我撰写了这本书，我谨此深表谢意。

J. Friedel 教授对我惠予了极其有益的教诲和建议，并仔细地审阅了本书的内容，我愿表示衷心的感谢。

我还要感谢A. Nicolas教授反复校核了地质蠕变部分的章节。

I. Saxl 先生允许我引用了尚未发表的论文，我愿在此一并向提供帮助的 F. Kroupa 先生及 J. Čadek 教授表示谢意。

法国和许多国家的研究人员寄来了未发表过的论文和照片，为此我要向 B. Baudelet, T. Ben Marzouk, I. G. Crossland, B. Escaig, B. Jones, A. Lasalmonie, A. Nicolas, V. Pontikis, J. L. Strudel, J. Weertman先生等人致以衷心的感谢。

此外，Y. Adda和 J. Philibert先生对原稿提出过许多宝贵的意见，也请接受我诚挚的谢意。

我的感谢还应包括绘制本书插图的SACLAY 情报中心和授权出版本书的原子能委员会。最后，我特别要向自始至终鼓励我的工业部长F. Sébilleau 先生表示最深切的感谢。

J. P. Poirier

前 言

固体在高温下的塑性变形是材料科学的一个重要领域，事实上，材料的加工成型在高温非常容易。另外，认识高温变形的规律对于控制高温构件使用过程中的变形也有重要意义。

所谓“高温”当然因材质及其熔点而异，通常将熔点绝对温标的一半视为高温，这个不很严格的界限对应于固体中扩散过程足够快以致扩散对塑性变形起重要作用的下限温度。

也许是因为现象太复杂的缘故，对高温塑性变形进行严格的理论研究(或物理学研究)还是较为近期才开始的。但研究工作却愈来愈活跃，特别是最近十年来发表了大量的有关实验结果及物理模型方面的文献。本书中将依次讨论关于高温塑性变形的唯象的、经验的和物理的研究结果，并将这三种不同处理方法加以贯穿以搞清这些方法所提出的观点在何种程度上相一致，从而尽可能详细地讨论固体的高温塑性变形。

在详细讨论本书要涉及的具体内容之前，首先区别一下所谓的物理的、经验的或唯象的研究也许是不无益处的。

对某一系统或现象的物理研究的最终目的是用一集中的或广延的变量关系通过数学形式描述外界对系统的作用和系统对作用的反应，这个数学关系式中当然要包含表示系统性质的系数，如果所得的关系式能够说明实验结果，式中只含有必要而充分的变量，关系式的形式以及各项的意义均被微观的物理学研究证明是合理的，则可以说物理研究的目的已达到，产生了物理学法则。

相反，尽管某种数学关系式也能够完全描述实验结果，但如果这个关系式仅仅是形式上将某些无根据的变量联系起来，且系数

也不具有与系统性质相应的大小,则该关系只是经验关系,这种关系式的特点是量纲一般不正确并含有一些微妙的数值系数,这些系数掩盖着实际上存在而没有搞清的变量的作用。这种关系式一般通过拟合全部实验点的曲线得到,实质上经验关系和变量的处理有关,因而只有在限定的条件下才能使用。但是经验关系对于那些尚未把握物理机制的现象的研究有很大的作用,因为可通过经验关系系统地整理和分类重要的实验结果,限定成立的范围,从而确定变量及其相互关系,奠定物理研究的基础。

第二种数学关系式便是唯象关系。唯象关系的量纲是正确的,它是用宏观变量描述系统的行为,如果唯象法则始终是正确的,则所提出的物理机制或模型也应能用唯象法则表示,但是有时物理机制完全不同的现象可以用一个唯象法则正确地描述。

为了建立贯穿本书思路的基础并明确以后经常用到的各种变量的意义,在第一章中论述恒温变形的唯象理论,另外还讨论通常进行的两大类试验方法即恒载荷或恒应力蠕变试验和恒变形速度试验(拉伸、扭转、轧制等)。第二章讨论塑性变形力学状态方程的存在条件以及适当的变量和若干必要的参数,明确以后经常被引用的一些条件,并在此基础上讨论稳态问题。第三章阐述塑性变形的稳定性。

本书的第二篇涉及塑性变形的经验和半经验关系,说明以后要重点讨论的主要实验结果。第五章讨论温度对应变速度的影响。首先引入激活能的半经验概念,然后扼要地说明应变速度激活能与自扩散激活能之间关系的有关实验结果,这个关系是几乎所有物理模型的基础。第六章阐述在各种试验条件即蠕变、拉伸、压缩、扭转、轧制和高速变形条件下稳态力学状态方程 $\dot{\epsilon}=f(\sigma)$ 的半经验研究。第七章讨论材料组织结构及其与力学状态方程的关系,尤其着重讨论多边形化导致的亚结构的形成与发展及其在变形中的作用。

第三篇是本书最重要的部分。我们将看到如何从理论上处理

用唯象的和半经验的研究所分类的实验结果，以及这些结果又怎样反过来用以证明和改进微观模型。第八章讨论热激活过程的热力学处理。为此先较详细地说明最初用热力学方法处理固体塑性变形的Eyring, Kauzmann 的热激活过程的原著，他们的论文经常被引用却几乎没有被人重读。但是了解将热激活参量引入塑性变形的历史对理解激活能的意义是至关重要的。第九章评述由恢复控制的蠕变模型。这些模型可分成两大类：建立在Bailey-Orowan的 $\dot{\epsilon} = r/h$ 关系基础上的模型和建立在Orowan的 $\dot{\epsilon} = \rho_0 bV$ 关系基础上的模型。如果假定恢复是由位错通过攀移销毁的过程控制，则两者是等价的。第十章讨论蠕变速度受位错热激活滑移控制的情况，主要说明经常被引用的，基于有效应力和内应力概念的最近的模型。第十一章讨论与位错无关的变形，由表面或晶界间的物质传输造成的蠕变即扩散蠕变机制。着眼于变形的协调，讨论体扩散和晶界扩散引起的蠕变理论，扼要说明纯金属、固溶体和弥散相合金的主要实验结果。特别提及零蠕变实验结果。然后讨论空位的产生或消失为不完全的情况以及合金和离子晶体的某些特殊问题。第十二章讨论超塑性现象，这一现象的工业应用前景是众所周知的。基于相变型超塑性和结构型超塑性曾经长期处于混乱状态，因此，首先说明其原因，然后重点讨论结构超塑性研究的重要实验结果及最近提出的模型。

以后几章讨论各种类型的固体与纯金属不同的行为及特殊的变形问题。第十三章讨论低浓度及高浓度固溶体；第十四章讨论含有弥散相的合金；第十五章讨论非金属晶体的高温变形，论述各种结合键对塑性的影响，如半导体共价键，过渡族金属碳化物，离子晶体及陶瓷等。

最后概述了地质学者和地球物理学者感兴趣的地球规模的岩石的高温变形和蠕变机制，主要以冰和硅酸盐的蠕变说明这个领域的实验结果。

目 录

序言	i
译者序	iii
原序	v
前言	vii
第一篇 高温变形的唯象理论	1
第一章 概论	1
1.1 变形	1
1.2 弹性变形和滞弹性变形	2
1.3 塑性变形	2
1.3.1 加载种类	3
1.3.2 各向同性晶体恒温塑性变形的主要特点	3
第二章 力学状态方程	6
2.1 问题的提出	6
2.2 状态方程的存在条件	8
2.3 对 $\log \sigma - \log \dot{\epsilon}$ 图的几点讨论	10
2.4 稳态问题	11
第三章 变形稳定性	14
3.1 概论	14
3.2 变形稳定性判据	15
3.2.1 Rossard 判据	15
3.2.2 Hart 判据	17
3.2.3 Campbell 判据	20
3.3 实验事实	22
第二篇 高温变形的经验关系	24

第四章 概论	24
4.1 经验和半经验定律	24
4.2 变量的选择	25
4.3 $\dot{\epsilon}$ 随时间的变化, Andrade 定律	27
4.4 静水压力的影响	30
4.5 温度、应力和组织的影响	31
第五章 温度对变形速度的影响	35
5.1 概述	35
5.2 确定激活能的方法	37
5.2.1 $\log \dot{\epsilon}$, $\frac{1}{T}$ 作图法: 等温法	37
5.2.2 补偿时间法	38
5.2.3 变温法	39
5.2.4 Q 与 σ 的关系	40
5.2.5 Zener-Hollomon 参数法	42
5.3 变形速度激活能和自扩散激活能的相互关系	43
5.4 弹性模量的温度变化对 Q 的修正	47
5.5 激活能随温度的变化	50
5.5.1 铝	50
5.5.2 密堆六方金属	52
第六章 变形速度和应力的关系	56
6.1 概述	56
6.1.1 蠕变	56
6.1.2 恒速度实验(拉伸、压缩、扭转、挤压)	57
6.1.3 高速变形实验	60
6.1.4 $\log Z$, $\log[f(\sigma)]$ 曲线	60
6.2 $\dot{\epsilon}$ 和 σ 间的半经验方程	60
6.2.1 低应力蠕变	61
6.2.2 高应力或高速度变形	65
6.3 堆垛层错能对力学状态方程参数的影响	72

第七章 变形速度和显微组织结构间的关系	75
7.1 概述.....	75
7.2 力学参数和晶粒的关系.....	77
7.3 力学参数和亚晶粒的关系.....	78
7.3.1 多边形化亚结构的描述.....	78
7.3.2 外应力和亚晶粒尺寸的关系.....	82
7.3.3 亚晶粒内的位错密度.....	85
7.3.4 亚结构的形成.....	85
7.3.5 在稳态阶段亚结构的发展.....	87
7.3.6 变形过程中的再结晶.....	88
7.4 亚结构的作用.....	90
第三篇 高温塑性变形的物理机制	92
第八章 塑性变形物理机制概述	92
8.1 宏观变形与位错运动的关系.....	92
8.1.1 滑移引起的变形.....	93
8.1.2 攀移引起的变形.....	95
8.2 热激活体系.....	97
8.2.1 历史.....	97
8.2.2 热力学处理.....	99
8.3 高温变形.....	108
8.3.1 热激活滑移处理方法.....	109
8.3.2 硬化-软化动态平衡方法.....	110
第九章 恢复蠕变模型	111
9.1 建立在硬化-恢复平衡基础上的蠕变模型.....	111
9.1.1 McLean(1966)模型.....	112
9.1.2 Nabarro(1967)模型.....	115
9.1.3 其它模型.....	118
9.2 根据硬化-恢复平衡假设计算蠕变速度 $\dot{\epsilon}$ 的表达式	
同由Orowan关系得到的表达式的等价性.....	118

9.2.1 h 的计算	119
9.2.2 r 的计算	120
9.2.3 攀移速度	121
9.2.4 根据 σ 计算 $\dot{\epsilon}$	123
9.3 由Orowan关系得出的模型	124
9.3.1 由Weertman重新导出的Nabarro 模型	124
9.3.2 Weertman模型(1968,1972)	125
9.3.3 与亚晶粒相关的模型	128
9.4 恢复蠕变模型的讨论	133
第十章 热激活滑移蠕变模型	137
10.1 概述	137
10.2 滑移驱动力为外应力	140
10.2.1 Barrett和Nix(1965)模型	140
10.2.2 Li(1963)模型	143
10.3 滑移驱动力为有效应力	144
10.3.1 Ahlquist, Gasca-Neri和Nix(1970) 的模型	144
10.3.2 Saxl和Kroupa(1972)模型	148
10.4 评注	150
10.5 交滑移的热激活	151
第十一章 扩散蠕变	155
11.1 概述	155
11.1.1 扩散蠕变状态方程的简单推导	156
11.1.2 结果	158
11.2 扩散蠕变理论	161
11.2.1 Nabarro-Herring蠕变: Herring 模型(1950)	161
11.2.2 Coble模型(1963)	163

11.2.3 变形的相容性——晶界滑移	170
11.2.4 Raj和Ashby (1971) 的计算	171
11.3 扩散蠕变实验示例	173
11.3.1 丝和薄膜的蠕变	173
11.3.2 单相细晶粒多晶体的扩散蠕变	175
11.3.3 弥散相多晶体的扩散蠕变	181
11.4 由界面反应控制的蠕变速度	183
11.5 合金扩散系数的选择问题	189
11.6 离子晶体的电荷和非化学计量问题	189
第十二章 超塑性	196
12.1 概述, 历史	196
12.2 超塑性唯象学	199
12.3 相变超塑性	202
12.4 组织超塑性	205
12.4.1 特点和出现的条件	205
12.4.2 变形速度敏感性	208
12.4.3 变形速度激活能	209
12.4.4 显微组织	210
12.4.5 物理机制: 提出的模型	214
12.4.6 工艺应用	221
第十三章 固溶体的蠕变	222
13.1 概述	222
13.2 回顾: 位错和固溶原子间的交互作用	224
13.2.1 全位错和固溶原子间的长程弹性交互作用 (Cottrell效应)	224
13.2.2 扩展位错和溶质原子的交互作用 (Suzuki 效应)	227
13.3 异类固溶原子对蠕变速度的可能影响, 扩散系数的 选择	230

13.3.1 弱的溶质-位错交互作用能	230
13.3.2 强的溶质-位错交互作用能	234
13.4 固溶体蠕变研究的经验处理	235
13.5 粘滞性拖拽模型	236
13.5.1 拖拽力由位错和溶质原子的弹性交互作用引起	236
13.5.2 牵引力由溶质原子在层错上的偏聚引起 (Suzuki 效应)	238
13.5.3 短程有序的情况	239
13.5.4 Weertman 模型(1957)	239
13.6 实验结果	242
13.6.1 稀固溶体	242
13.6.2 高浓度固溶体	248
第十四章 弥散相合金的蠕变	253
14.1 概述	253
14.1.1 弥散相材料的种类	253
14.1.2 弥散相的特点	255
14.1.3 弥散相合金蠕变的一般特点	257
14.2 弥散相复合材料的蠕变	259
14.2.1 实验结果	259
14.2.2 模型	263
14.2.3 结论	268
14.3 镍基超合金的蠕变	268
第十五章 非金属晶体的蠕变	271
15.1 概述	271
15.1.1 金属键	272
15.1.2 共价键	272
15.1.3 离子键	274
15.1.4 范德瓦尔斯键 (分子键)	275

15.2 半导体共价晶体的蠕变	276
15.2.1 高外应力	276
15.2.2 低应力, S形蠕变	278
15.2.3 Haasen 模型(1966)	278
15.3 金属碳化物的高温变形	281
15.3.1 碳化物的结构和变形方式	281
15.3.2 过渡族金属碳化物	283
15.3.3 铀和钚的碳化物	285
15.4 离子晶体的蠕变	286
15.4.1 碱金属卤化物	287
15.4.2 二元金属氧化物	289
15.5 塑性分子晶体的蠕变	289
第十六章 地质学中的蠕变	293
16.1 概述	293
16.1.1 序言	293
16.1.2 地球构成的简要概念	294
16.2 冰川的高温变形	296
16.2.1 冰的结构和变形模型	296
16.2.2 高温变形实验	298
16.3 方解石和石灰岩的高温变形	301
16.4 石英的高温变形	302
16.4.1 石英的结构	302
16.4.2 石英的变形方式, 水的影响	302
16.5 橄榄石和橄榄岩的高温变形	304
16.5.1 橄榄石的结构和变形方式	304
16.5.2 实验结果	306
16.6 外层地幔的蠕变	308
参考文献	311
名词索引	353