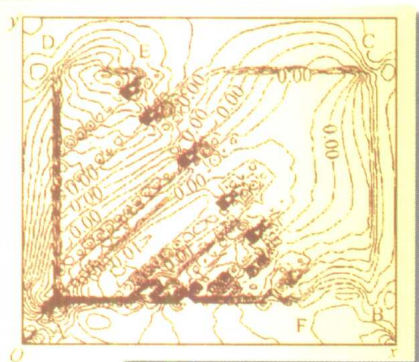
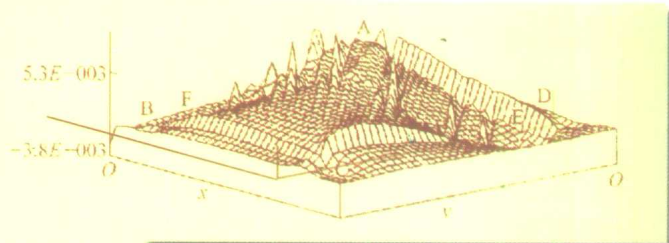




物理介观力学和材料的 计算机辅助设计

〔俄〕B.E.潘宁 主编
万群 马福康 郭青蔚 等译
万群 郭青蔚 校

冶金工业出版社

物理介观力学和

材料的计算机辅助设计

[俄]B.E.潘宁 主编

万 群 马福康 郭青蔚 等译

万 群 郭青蔚 校

北 京

冶金工业出版社

2002

ФИЗИЧЕСКАЯ
МЕЗОМЕХАНИКА

И

компьютерное
конструирование
материалов

Ответственный редактор
академик В. Е. Панин

НОВОСИБИРСК
“НАУКА”

СИБИРСКАЯ ИЗДАТЕЛЬСКАЯ ФИРМА РАН
1995

北京市版权局著作权合同登记号 图字:01-98-1909 号

图书在版编目(CIP)数据

物理介观力学和材料的计算机辅助设计/(俄)潘宁(Панин, В. Е.)主编;万群等译.—北京:冶金工业出版社,2002.6

ISBN 7-5024-2992-1

I. 物… II. ①潘… ②万… III. ①量子电子学 ②计算机应用—金属材料—材料力学性质—分析 ③—计算机应用—半导体材料—材料力学性质—分析 IV. TN201

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 036536 号

出版人 曹胜利 (北京沙滩嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009)

责任编辑 李培禄 美术编辑 李 心 责任校对 侯 璐 责任印制 牛晓波

北京鑫正大印刷有限公司印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

2002 年 6 月第 1 版, 2002 年 6 月第 1 次印刷

850mm × 1168mm 1/32; 15.5 印张; 415 千字; 478 页; 1-2000 册

42.00 元

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街 46 号(100711) 电话:(010)65289081

(本社图书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

译者前言

20 世纪 80 年代初期在变形固体力学中出现了一门新的学科——结构非均一介质的物理介观力学。以俄罗斯科学院西伯利亚分院材料学及强度物理研究所所长 B. E. 潘宁院士为代表的俄罗斯物理介观力学学派的研究成果在 20 世纪 90 年代中期经中俄双边国际新材料、新工艺研讨会的举行而被介绍到中国来。该学派所提出的物理介观力学的理论概念以及所取得的实验验证结果,得到了中国材料冶金学界的同行和权威学者师昌绪院士、王淀佐院士等的重视及肯定。在第三届中俄双边国际新材料、新工艺研讨会上得到本书俄文版原著之后,中方组委会主席王淀佐院士偕同万群及马福康教授倡议将其翻译成中文,以促进中俄两国材料学界的专家和学者们的交流与合作。

俄文版原著共分上下两册,总计 27 章。经征得作者的同意,中文版略去了与阐明物理介观力学原理直接关联较少的第 18 章及第 20~27 章。我们认为译出的章节已能较为完整地反映了俄罗斯学者 10 多年来在这一领域研究形成的理论体系,包括固体塑性变形及断裂的介观力学物理原理、局域性变形的波动特性、弹性介质中波动的动力学唯像理论、固体的塑性流动的空间即时图像规律性、不同应力状态及断裂机制下的介观结构特点,以及在介观层次上预测材料断裂的实验方法和利用介观力学的原理进行材料计算机设计的探索等。

本书译文由万群教授及郭青蔚教授负责最终的审校。马福康教授翻译第 1、2 章,米绪年博士翻译第 3 章,万群教授翻译第 4、5、6、10 章,张金波教授翻译第 7、8、9 章,蓝运富教授翻译第 11、12、13 章,郭青蔚教授翻译第 14、15、16、17、18 章。本书翻译集体对万群教授在卧病期间坚持完成译校工作的负责精神和严谨的学

风表示崇高的敬意,并谨以此书的出版表达我们对这位材料学界知名专家的深切怀念。

为力求对专有名词理解及译法的准确性,我们专门订购了本书剑桥国际科学出版社 1998 年出版的英文版本,并汇编了中俄英文专有名词对照表。物理介观力学属于一个相当新的研究方向,而编译集体的成员少有这一领域的直接研究经历,因而译文中的不妥之处敬请各方面的专家不吝指正。

谨以本书的出版作为对中俄两国冶金及材料学界坚持连续联合举行中俄新材料、新工艺研讨会十周年的纪念。

中文版前言

我非常高兴《物理介观力学和材料的计算机辅助设计》一书中文版的出版。本书首版于 1995 年在俄罗斯发行。该书当时是作为早先出版的一些关于介观化学方法解决固体强度和塑性问题专著的扩充版而出版的。3 年后,本书的英文版由英国剑桥国际科学出版社出版。

当前,人们对介观力学及其应用于材料科学的兴趣与日俱增。自 1998 年以来,国际期刊《介观力学》在俄罗斯托木斯克市一直以双月刊的形式出版。物理介观力学作为新科学技术发展趋势,一直是在俄罗斯托木斯克市和贝加尔湖附近的贝加尔市举行的第六届国际学术会议的论题。根据在托木斯克市举行的“介观断裂力学 96”国际会议上与会者的建议,每两年在不同国家就此命题举行一次国际学术会议。“介观力学 98”和“介观力学 2000”已分别在以色列和中国举行过。“介观力学 2002”国际会议将在丹麦举行。物理介观力学在材料科学上的应用是每两年由中国和俄罗斯分别组织举行的“先进材料和工艺方法”学术讨论会上引起广泛注意的课题。

各种各样先进材料的开发是 20 世纪下半叶的特点。非常复杂的内部结构材料、表面强化和涂层沉积材料、梯度和复合材料、电子工业用薄膜和多层芯片、纳米级晶体材料等等,正广泛应用于各工业领域。21 世纪对先进结构材料 and 功能材料的高度需求以及它们在极端负载条件下的使用,要求开发材料设计的新方法。计算机技术将在 21 世纪得到更快发展。计算方法和技巧将是先进材料和先进工艺的计算机辅助设计的主要基础。但是,这只有在将固体材料的内部结构和在所有尺度水平上结构单元的非常复杂的相互作用因素考虑在内,才能得以实现。通常的材料科学不足以解决这些难题。建立在固体变形的结构水平概念上的物理介

观力学曾提出过解决这些问题的方法。

在物理介观力学中,业已提出过描述固体的塑性变形和断裂的一种全新的方法。按照物理介观力学的概念,固体物体的塑性变形和断裂与作为一种多层次发展的弛豫过程的剪切稳定性的损失有关。这种过程是建立在一些协同原理基础上的^[1~6]。

(1) 在负载下固体中出现的剪切,是由于材料介质所承受的局域剪切稳定性的损失所引起的,并且作为一种在原始内结构中变化的局域转换,可以在微观、介观和宏观水平上发生。

微观水平:在微观层次上的原始晶格的局域结构转换,表明它本身就是一种位错芯的成核和它们在应力梯度场中的运动。

介观水平:内结构所承受的局域稳定性的损失,既在微观水平上发生,也在介观水平上发生。这一效应显示出如像在内结构单元的单个团块内扩展的介观水平局域化的变形条带,这种内结构单元的自组织会造成在介观水平上产生变形试样的裂解。

宏观水平:一个加载的固体物体作为一个实体正承受一个总体性的剪切稳定性损失,如像在试样中扩展的一个宏观条带或两个平行宏观条带(呈双极的形式)或在测试样片中扩展的一些共轭条带的形成那样。该过程最后以样品破裂成两部分而告终结。

(2) 任何尺度水平上的剪切只能在所涉及尺度的应力集中中心的局域区段上发生,因为当平均施加的应力起作用时,一个加载固体物体的结构在整体上仍保持它们的剪切稳定性不变。

(3) 负载固体物体中的最低剪切稳定性出现在它们的自由面上。因这一缘故,初始的弹塑性剪切会发生在表面层内,并沿着最大的正切应力方向扩展。初始应力集中中心是测试机器夹头(或者是一个外负荷作用点)。材料表面层中由弹塑性剪切引发的二次应力集中中心,由于应力诱发不同尺度的缺陷的生成而承受松弛。后者贯穿样品的体积,引起它们塑性流动和断裂。

(4) 在具有受约束的材料旋转的连续介质中,剪切可在其途中形成弯曲-旋转区。后者是另外一个应力集中中心。

(5) 剪切作为在给定界面条件下和在有限的弹塑性介质中的

一个弛豫过程,可形成阻尼-弹性自振荡和弹塑性自振荡。

(6) 固体塑性变形按以下模式扩展:初始的(基本的)应力集中点是生成局域性弯曲-扭转区的受约束旋转的弛豫剪切,而随后的弛豫剪切则伴随有介质的弹性和弹塑性自激振荡,等等。如果这种自激振荡过程是局域在客观水准上,这样的过程便会明显地显现出来。总体情况是,这种自激振荡过程是在一些相互作用的尺度水平上发展,同时引起变形的局域化尺度的广谱。

(7) 负载下固体物体剪切内的自组织和剪切引发的弹塑性旋转模型(model)与弯曲-扭转区的自相容性(self-consistency)有关:对负荷定轴而言,旋转和弯曲-扭转量之和为零,这种零值是对包含在塑性变形内所有的自相容结构水平上的剪切谱系(连续性条件)。违反这一条件,便引起如像适应调节特性变形旋转模型那样的破裂。

(8) 整体剪切-稳定性损失和断裂,可在一个宏观尺度应力集中中心的局域化点上观察到,并且由控制与介观和微观弛豫过程相适应的局域化变形的宏观条带的发展方向来确定。

(9) 塑性变形的机制和应力-应变曲线的相应阶段在尺度上是无变化的(尺度不变性原理)。

正是非均匀介质介观力学的方法论,才得以实现以固体所需要的强度、塑性和可靠性为特征的先进材料的计算机辅助设计。

物理介观力学尚处幼年时期。但毫无疑问,它将是21世纪力学发展和一系列应用的主要方向。

必须满意地指出,力学界知名的中国专家薛昌明、白以龙、洪友士、余寿文业已在物理介观力学的发展上做出重要贡献。薛昌明教授曾是在西安举行的“介观力学2000”学术会议的主席之一,由他发起建立了介观力学国际协会。

我想向马福康教授和万群教授表示热烈的谢忱,感谢他们在本书中文版的翻译和出版中做出的努力。

B.E.潘宁院士

2002年1月

参考文献

- 1 Panin V E. Foundations of physical mesomechanics. Phys. Mesomech. , 1998; 1 (1):5
- 2 Panin V E. Overview on mesomechanics of plastic deformation and fracture of solids. Theor. Appl. Fracture Mech. , 1998; 30(1):1
- 3 Panin V E. Physical mesomechanics of solid surface layers. Phys. Mesomech. , 1999; 2(6):5
- 4 Panin V E. Synergetic principles of physical mesomechanics, Phys. Mesomesh. , 2000; 3(6):5
- 5 Panin V E. Modern problems of physical mesomechanics. In: Sih G C ed. Proc. Inter. Conf. "Mesomechanics'2000". Beijing: Tsinghua University Press, 2000: 127
- 6 Panin V E. Surface layers of solids under loading as mesoscale structural level of plastic flow. Phys. Mesomech. , 2001; 4(3):5

在 20 世纪 80 年代初期,变形固体力学中产生了一个新的学术方向——结构非均匀介质的物理介观力学。其原理是一种新的思路模式,即固体变形的结构层次概念。在其产生初期作为一种颇有争议的观念,在最近 10 年间得到了令人信服的实验和理论上的论证,并提供了将致密介质力学与基于位错理论形成的强度和塑性物理学结合起来的途径。此前的几十年内,在传统的观念范围内从未看到两者之间互相沟通的渠道。从物理介观力学角度来观察,在不同尺度层次上对塑性变形的描述是有原则区别的。为了将微观和宏观尺度层次联系和结合起来,应研究新的科学理论,其方法学在本质上应有别于为致密介质力学和位错理论所公认的方法学。

在介观力学中,塑性变形的最基本的行为不是剪切滑移,而是平移-扭转的涡流,其中三维结构单元的平移与扭转的运动模式互相有机地联系着。塑性变形的扭转模式将介质的结构层次谱系引导至自协调的运动状态,并使其中出现新的耗散结构。在变形固体整个体积中之自协调的变形遵循固体变形的结构层次定律。根据这一定律,在不破坏致密性的塑性变形的条件下,在介质结构层次的整个谱系上的变形缺陷流之旋量的总和等于零。

介观力学认为断裂是塑性变形的结束阶段,此时材料中所形成的局域化的平移-扭转涡流的尺寸已和试样横断面尺寸相当,涡流中初始滑移的旋量已不能被所有的适应性调节缺陷流的旋量和所平衡(补偿),裂纹则成为晶体学适应性扭转的必然机制。换言之,断裂是当材料已耗尽自己的适应调节可能性时出现的微观及介观组织演化的最后阶段。把负荷下的固体作为一个多层次的自组织系统,其中微观、介观及宏观层次是互相有机地联系的,这就是物理介观力学研究的对象。本书的第 1 章~第 13 章主要探讨

上述问题。

第 14 章 ~ 第 18 章则介绍如何将物理介观力学应用于设定性能的新材料之计算机设计和创建新一代材料以及其强化的方法问题。物理介观力学可以将所有有关材料的信息,包括材料的成分、结构、性能、在多种载荷条件下的行为特点等引入到计算机中。这样就可以在计算机中不只是进行具有指定性能的材料设计,而且可以模拟实际的负载状况,分析预测材料的可靠性及其工作潜力。

本书中阐述了新材料计算机设计的方法原理、各种材料在一定负载条件下塑性变形和断裂过程计算机模拟技术的方法及算法以及其制备的方法及原理。较多的篇幅用于介绍在外力作用下多相介质中所产生过程的物理分析。利用物理介观力学的原理研究形成了新一代材料的设计方法、制备工艺以及强化手段,并用于创建以金属和陶瓷为基,具有高的强度、耐磨性、抗蚀性指标的结构及工具材料。书中推荐了高效率的用于结构及工具材料的离子溅射表面强化工艺、强超声波辐照技术以及复合材料的适应性脉冲堆焊工艺。

本书具有纪念性质,因为该书总结归纳了俄罗斯科学院西伯利亚分院强度物理及材料学研究所成立 10 年来所取得的成果。

B.E. 潘宁院士

本书介绍了结构非均一介质的物理介观力学的基本原理。物理介观力学是在均一介质力学（宏观层次）与固体强度和塑性的物理学（微观层次）衔接处发展形成的。负载的材料被看成是一个多层次的体系，其中微观、介观及宏观各层次互相有机地联系着。作者的研究工作表明，每一尺度层次上的变形均有自己特定的机制与规律。而在介观层次上，变形带有涡旋特征。材料的断裂可描述为涡旋塑性变形的结尾阶段。

这一专著是物理介观力学领域具有代表性的论著，主要供在材料强度与塑性的物理和力学以及物理和应用材料学领域工作的专家、学者以及研究生、高年级大学生参阅。



1 固体塑性变形及断裂的介观力学物理原理	(1)
1.1 变形固体力学的现状	(1)
1.2 变形固体的协同学	(2)
1.3 位错源的本质	(10)
1.4 不同尺度层次上条带组织的分类	(13)
1.5 变形的旋转模式谱系及分形学的维度	(22)
1.6 塑性变形及断裂的物理介观力学	(26)
1.7 塑性及超塑性的判据	(30)
1.8 介观层次上的断裂机制及判据	(34)
1.9 固体变形结构层次定律	(43)
1.10 结论	(46)
参考文献	(48)
2 塑性变形动力学,固体中局域性塑性变形波	(51)
2.1 问题的现状	(51)
2.2 波动方程	(54)
2.3 熵产量及塑性变形的不可逆性	(57)
2.4 塑性变形波	(59)
2.5 晶界滑动	(68)
2.6 波动模型及亚韧性断裂的判据	(72)
2.7 结论	(78)
参考文献	(78)
3 结构非均匀介质塑性和断裂的微观动力学理论	(80)
3.1 变形与断裂的结构层次	(80)
3.2 结构非均匀介质弹塑性流变的数学模型	(86)
3.3 描述介质二维平面流变的系统方程	(92)
3.4 多晶试样的变形和断裂前阶段的模型计算	(93)

3.5	多层次弛豫的表象模型·····	(98)
3.6	结论·····	(101)
	参考文献·····	(102)
4	用校正场不变式表述结构非均匀介质的变形·····	(104)
4.1	概述·····	(104)
4.2	微极性材料理论·····	(105)
4.3	非均匀结构介质变形的校正理论·····	(111)
4.4	结论·····	(114)
	参考文献·····	(115)
5	在弹塑性介质中波的动力学校正理论·····	(116)
5.1	导言·····	(116)
5.2	弹性介质的拉格朗日函数的对称性·····	(117)
5.3	建立对局域平移团簇不变的拉格朗日方程·····	(118)
5.4	校正理论的场与常数的阐释·····	(120)
5.5	耗散函数·····	(124)
5.6	弹塑性介质的动力学方程·····	(124)
5.7	相对局域转动团簇的拉格朗日不变式的建立·····	(125)
5.8	无耗散性弹塑性介质的频散关系式和正常振 动的形态·····	(127)
5.9	存在耗散时的频散关系式·····	(129)
5.10	塑性转动波·····	(130)
5.11	偏应力波的边界频率及表皮层效应·····	(131)
5.12	理论参数的定量测算·····	(132)
5.13	结论·····	(133)
	参考文献·····	(134)
6	在介观力学和计算条带结构课题中的弛豫单元方法·····	(135)
6.1	塑性变形非均匀场的连续统概念问题·····	(135)
6.2	对固体的塑性变形与其局域体积内应力弛豫的 相互关系的分析·····	(136)
6.3	弛豫单元方法·····	(140)

6.4	带有塑性变形源平面中的应力集中	(144)
6.5	在多晶体中吕德尔斯带萌芽的连续统模型	(146)
6.6	局域化塑性变形条带相互作用对应力集中 的影响	(153)
6.7	结论	(162)
	参考文献	(163)
7	固体塑性流变空间-时间场的规律性	(164)
7.1	问题的现状	(164)
7.2	塑性分析中反射-干涉谱量度法的应用	(165)
7.3	变形场的基本规律	(166)
7.4	变形局域化的演化	(173)
7.5	结论	(174)
	参考文献	(175)
8	材料在介观水平上的光学-电视研究方法和诊断学	(177)
8.1	导言	(177)
8.2	在拉伸状态下多晶结构合金中介观缺陷形成 的特点	(178)
8.3	ОТНС 与材料表面拓扑结构的监控手段	(180)
8.4	ОТНС 与显微形貌测量	(192)
8.5	结论	(195)
	参考文献	(195)
9	多晶体的介观亚结构和疲劳断裂	(197)
9.1	基本原理	(197)
9.2	交变载荷时多晶在介观级上结构变化的一般 规律	(198)
9.3	铅中的平移-转动旋涡和旋转位移型的介观 亚结构	(200)
9.4	样品几何尺寸对介观块状亚结构形成的特性 和运动学的影响	(206)
9.5	合金化对铅的介观亚结构和周期寿命的影响	(208)

9.6 结论	(216)
参考文献	(216)
10 介观结构的动力学和奥氏体钢与合金的超塑性	(218)
10.1 多晶体介观力学概述	(218)
10.2 塑性流变进程中结构-取向的不稳定性和 耗散型结构的演化	(219)
10.3 在深度和超深度变形下具有极限歪曲晶格的 缺陷亚结构的特征	(230)
10.4 轧制织构的演化和介观水平在织构变化中的 作用	(233)
10.5 介观结构对奥氏体钢及合金的超塑性的影响	(237)
10.6 低温超塑性变形中结构变化的周期性和转向 的协同波	(246)
10.7 塑性流变的局域化与断裂	(254)
10.8 结论	(259)
参考文献	(260)
11 多晶体在拉伸状态下介观及宏观规模的条带结构	(263)
11.1 应力中心在条带结构形成中的作用	(263)
11.2 弱介观应力集中区	(265)
11.3 强介观应力集中区	(271)
11.4 宏观应力集中区	(273)
11.5 结论	(275)
参考文献	(276)
12 晶界的扩散调节过程与多晶体金属的塑性	(277)
12.1 导言	(277)
12.2 实现扩散引发的晶界迁移和再结晶的条件	(279)
12.3 以杂质晶界扩散的影响实现多晶体中的 超塑状态	(287)
12.4 结论	(292)
参考文献	(293)

13 高负荷摩擦时金属表层的结构特征	(296)
13.1 命题情况.....	(296)
13.2 在由摩擦产生的高能作用下的材料表面构成.....	(297)
13.3 摩擦表层形成机制的分析.....	(301)
13.4 提高摩擦面耐久性的若干办法.....	(305)
13.5 结论.....	(308)
参考文献.....	(309)
14 给定强度性能材料的计算机设计的研究方法	(311)
14.1 导言.....	(311)
14.2 塑性增益理论的变异表达.....	(314)
14.3 对在结构不均匀介质中发生的塑性变形 局域化效应的计算机模拟.....	(329)
14.4 受材料内部构造不均匀性制约的应力-应变 状态的特点和塑性变形的局域化.....	(360)
14.5 连续介质荷载断裂的有限-差分模拟法	(365)
14.6 结论.....	(371)
参考文献.....	(372)
15 具有内结构的凝聚态介质的分立计算机模型	(374)
15.1 基本原理.....	(374)
15.2 分子动力学方法.....	(375)
15.3 网眼自动调节法.....	(386)
15.4 基元动力学法.....	(391)
参考文献.....	(398)
16 外部强力作用状态下原子间的相互作用 和材料性质的变化	(402)
16.1 基本原理.....	(402)
16.2 在非晶金属和合金中的动态浓度激活.....	(403)
16.3 正常状态和高压状态下金属和合金的 热力学性质.....	(414)
16.4 结论.....	(427)