



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

中 外 物 理 学 精 品 书 系

经 典 系 列 · 2 0

固体内耗理论基础： 晶界弛豫与晶界结构

重排本

葛庭燧 著



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS



中国科学院大学图书馆藏

中国科学院大学图书馆藏

固体内耗理论基础： 晶界弛豫与晶界结构

张卫平

张卫平 著

科学出版社



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

中外物理学精品书系

经典系列 · 20

固体内耗理论基础： 晶界弛豫与晶界结构

重排本

葛庭燧 著



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

固体内耗理论基础：晶界弛豫与晶界结构：重排本/

葛庭燧著. —北京：北京大学出版社，2014.12

(中外物理学精品书系)

ISBN 978-7-301-25142-3

I. ①固… II. ①葛… III. ①金属—内耗 IV.

①TG111.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 272385 号

书 名：固体内耗理论基础：晶界弛豫与晶界结构(重排本)

著作责任者：葛庭燧 著

责任编辑：张 敏

标准书号：ISBN 978-7-301-25142-3/O · 1026

出版发行：北京大学出版社

地 址：北京市海淀区成府路 205 号 100871

网 址：<http://www.pup.cn>

新浪微博：@北京大学出版社

电子邮箱：zpup@pup.pku.edu.cn

电 话：邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62765014

出版部 62754962

印 刷 者：北京中科印刷有限公司

经 销 者：新华书店

730 毫米×980 毫米 16 开本 34.75 印张 622 千字

2014 年 12 月新 1 版(重排本) 2014 年 12 月第 1 次印刷

定 价：96.00 元

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有，侵权必究

举报电话：010-62752024 电子邮箱：fd@pup.pku.edu.cn

“中外物理学精品书系” 编委会

主 任:王恩哥

副主任:夏建白

编 委:(按姓氏笔画排序,标*号者为执行编委)

王力军	王孝群	王 牧	王鼎盛	石 兢
田光善	冯世平	邢定钰	朱邦芬	朱 星
向 涛	刘 川*	许宁生	许京军	张 酣*
张富春	陈志坚*	林海青	欧阳钟灿	周月梅*
郑春开*	赵光达	聂玉昕	徐仁新*	郭 卫*
资 剑	龚旗煌	崔 田	阎守胜	谢心澄
解士杰	解思深	潘建伟		

秘 书:陈小红

序 言

物理学是研究物质、能量以及它们之间相互作用的科学。她不仅是化学、生命、材料、信息、能源和环境等相关学科的基础,同时还是许多新兴学科和交叉学科的前沿。在科技发展日新月异和国际竞争日趋激烈的今天,物理学不仅囿于基础科学和技术应用研究的范畴,而且在社会发展与人类进步的历史进程中发挥着越来越关键的作用。

我们欣喜地看到,改革开放三十多年来,随着中国政治、经济、教育、文化等领域各项事业的持续稳定发展,我国物理学取得了跨越式的进步,做出了很多为世界瞩目的研究成果。今日的中国物理正在经历一个历史上少有的黄金时代。

在我国物理学科快速发展的背景下,近年来物理学相关书籍也呈现百花齐放的良好态势,在知识传承、学术交流、人才培养等方面发挥着无可替代的作用。从另一方面看,尽管国内各出版社相继推出了一些质量很高的物理教材和图书,但系统总结物理学各门类知识和发展,深入浅出地介绍其与现代科学技术之间的渊源,并针对不同层次的读者提供有价值的教材和研究参考,仍是我国科学传播与出版界面临的一个极富挑战性的课题。

为有力推动我国物理学研究、加快相关学科的建设与发展,特别是展现近年来中国物理学家的研究水平和成果,北京大学出版社在国家出版基金的支持下推出了“中外物理学精品书系”,试图对以上难题进行大胆的尝试和探索。该书系编委会集结了数十位来自内地和香港顶尖高校及科研院所的知名专家学者。他们都是目前该领域十分活跃的专家,确保了整套丛书的权威性和前瞻性。

这套书系内容丰富,涵盖面广,可读性强,其中既有对我国传统物理学发展的梳理和总结,也有对正在蓬勃发展的物理学前沿的全面展示;既引进和介绍了世界物理学研究的发展动态,也面向国际主流领域传播中国物理的优秀专著。可以说,“中外物理学精品书系”力图完整呈现近现代世界和中国物理科学发展的全貌,是一部目前国内为数不多的兼具学术价值和阅读乐趣的经典物理丛书。

“中外物理学精品书系”另一个突出特点是,在把西方物理的精华要义“请进来”的同时,也将我国近现代物理的优秀成果“送出去”。物理学科在世界范

围内的重要性不言而喻,引进和翻译世界物理的经典著作和前沿动态,可以满足当前国内物理教学和科研工作的迫切需求。另一方面,改革开放几十年来,我国的物理学研究取得了长足发展,一大批具有较高学术价值的著作相继问世。这套丛书首次将一些中国物理学者的优秀论著以英文版的形式直接推向国际相关研究的主流领域,使世界对中国物理学的过去和现状有更多的深入了解,不仅充分展示出中国物理学研究和积累的“硬实力”,也向世界主动传播我国科技文化领域不断创新的“软实力”,对全面提升中国科学、教育和文化领域的国际形象起到重要的促进作用。

值得一提的是,“中外物理学精品书系”还对中国近现代物理学科的经典著作进行了全面收录。20世纪以来,中国物理界诞生了很多经典作品,但当时大都分散出版,如今很多代表性的作品已经淹没在浩瀚的图书海洋中,读者们对这些论著也都是“只闻其声,未见其真”。该书系的编者们在这方面下了很大工夫,对中国物理学科不同时期、不同分支的经典著作进行了系统的整理和收录。这项工作具有非常重要的学术意义和社会价值,不仅可以很好地保护和传承我国物理学的经典文献,充分发挥其应有的传世育人的作用,更能使广大物理学人和青年学子切身体会我国物理学研究的发展脉络和优良传统,真正领悟到老一辈科学家严谨求实、追求卓越、博大精深的治学之美。

温家宝总理在2006年中国科学技术大会上指出,“加强基础研究是提升国家创新能力、积累智力资本的重要途径,是我国跻身世界科技强国的必要条件”。中国的发展在于创新,而基础研究正是一切创新的根本和源泉。我相信,这套“中外物理学精品书系”的出版,不仅可以使所有热爱和研究物理学的人们从中获取思维的启迪、智力的挑战和阅读的乐趣,也将进一步推动其他相关基础科学更好更快地发展,为我国今后的科技创新和社会进步做出应有的贡献。

“中外物理学精品书系”编委会 主任
中国科学院院士,北京大学教授

王恩哥

2010年5月于燕园

原版序言

固体内耗研究的起始是对于高或低的阻尼材料的追求。20 世纪 40 年代末, 由于 C. Zener 的名著《金属的弹性和滞弹性》的出版, 而成为一门专门学科。1949 年 11 月我由美国回国后, 科学出版社一直要我写一本《金属中的内耗》的专著, 但我一直未能动笔。我的原意是希望能够写出一本有自己的独立见解的专著, 这就需要自己在这个领域的研究中有自己独特的创新和贡献。但是后来实践的经验指出, 越进行研究工作就越不敢动笔写专著。

若干年以来, 国外出版了一些关于固体内耗的专著, 主要的有 1972 年出版的 A. S. Nowick 和 B. S. Berry 的《结晶固体中的滞弹性弛豫》和 R. de Batist 的《结晶固体中的结构缺陷所引起的内耗》, 国内关于这方面的介绍除了包含在金属物理教科书以内的章节以外, 还有许多为教学所用的讲义和交流资料。另外, 国际上已经举行了 12 届固体内耗与超声衰减学术会议, 其中的第 9 届是 1989 年 7 月 17~20 日在我国举行的。最近一届(第 12 届)是 1999 年 7 月 19~23 日在阿根廷举行的。我国、欧洲、日本、苏联、法国也多次举行关于这个领域的学术会议, 大多都出版了会议论文集, 表示这个领域仍在蓬勃发展。

多年的研究工作表明, 内耗测量是探测固体内部的结构特点、结构缺陷和结构变化的非常灵敏的手段, 起着一种原子探针的作用。特别是这种测量并不需要破坏试样的原来结构, 并且可用同一试样进行反复测量。因此, 内耗技术的应用越来越广泛, 被用来探测各种类型的试样, 但是其目的只是获得有关的零散数据和信息, 而对于其中的因果关系阐述较少。

固体内耗实际上应该区分为内禀内耗和过程内耗。前者反映材料本身的(内禀的)阻尼性能, 而后者则是由于在测量内耗所用的应变振幅大得足以使试样发生永久变形(范性形变)或者在测量过程当中出现了材料的宏观结构的变化(相变), 从而产生了附加的大的内耗。因此, 过程内耗并不代表材料本身的内耗。内禀内耗一般来源于原子在外加的应力的诱导下所发生的原子尺度的热激活弛豫, 是属于滞弹性的范畴, 这就与所谓的黏弹性或静滞后大有区别。可以认为, 固体内耗理论基础应该主要包括固体的内禀内耗, 主要是阐述固体的滞弹性所表现的内耗和有关的滞弹性效应, 即滞弹性弛豫, 这牵涉到点缺陷弛豫、位错弛豫和晶界弛豫。本书的副标题是“晶界弛豫与晶界结构”,

着重论述晶界弛豫研究的开拓和新近发展,以我国科学工作者自己的实验工作成果和理论观点为主线,详细叙述了用内耗测量作为主要手段,从研究晶界的性质出发,逐步揭示晶界性能与晶界结构的关系,并提出合乎实验事实的晶界结构模型。在这长达 50 年的研究过程中始终贯穿着一系列的不同论点的争论和澄清,因而全书的内容是自洽的,是一部有独立见解的关于晶界弛豫研究发展史的专著。

在本书正文以前写了一篇较长的绪论,以便于读者在阅读正文之前对于本书的内容有一个初步的概括的了解。

关于这个领域,笔者曾写了一篇长达 113 页的题为“Contribution of Internal Friction Study on Grain Boundaries and Dislocation Substructures”的英文稿,刊登在 *Advances in Science of China: Physics*, 3, (eds. Zhu Hongyuan and Zhou Guangzhao, Science Press, Beijing, China, 1990), pp. 1 ~ 113. 笔者以此为基础,前后用了多年的时间写成此书。写作时在加深学习和消化大量原始文献的过程中,深深感到“学然后知不足”的道理,体会到自己对于“晶界弛豫”这个浩瀚的领域知之甚少,并且领悟不足,因而感慨甚深,但是壮心不已。为了庆祝我们伟大的社会主义祖国的 50 周年盛典,笔者愿意把这本专著献给跨世纪的青年一代,作为他们有朝一日研究这个领域的铺路石。粗浅不当之处,希望读者们评论和指正。

葛庭燧

1999 年 10 月,合肥,中国科学院固体物理研究所
内耗与固体缺陷开放研究实验室

目 录

绪论	(1)
第一章 力学弛豫与滞弹性内耗	(18)
§ 1.1 内耗的意义	(18)
§ 1.2 内耗的量度	(19)
§ 1.3 弛豫型内耗的唯象表现	(20)
§ 1.4 滞弹性内耗	(20)
§ 1.5 滞弹性内耗的微观机制和内耗源	(22)
§ 1.6 内耗研究的新进展及其应用	(23)
§ 1.7 内耗测试新方法和新技术设备	(26)
§ 1.8 晶界弛豫研究的发展	(27)
参考文献	(29)
第二章 晶界弛豫的早期研究	(30)
§ 2.1 晶界弛豫与晶界结构的关系	(30)
§ 2.2 滞弹性弛豫的葛型测量	(31)
§ 2.3 多晶铝和单晶铝的滞弹性测量结果	(34)
§ 2.4 Boltzmann 线性叠加原理及各种滞弹性效应之间的关系	(42)
§ 2.5 晶界的黏滞性滑动模型和晶界的黏滞系数	(48)
§ 2.6 晶粒间界弛豫特征的进一步分析	(50)
§ 2.7 晶界弛豫的形式理论	(58)
§ 2.8 影响晶界弛豫参数的各种因素	(65)
§ 2.9 晶界弛豫激活能与点阵扩散和晶界扩散激活能的联系	(75)
§ 2.10 晶界结构的小岛模型和无序原子群模型	(82)
§ 2.11 高温背景内耗	(90)
参考文献	(98)
第三章 杂质和合金元素对于晶界弛豫的影响	(102)
§ 3.1 晶界弛豫与晶界偏析	(102)
§ 3.2 关于杂质对晶界弛豫影响的一般叙述	(103)
§ 3.3 杂质在晶界的沉淀过程中和再溶过程中所引起的过程内耗峰	(112)

§ 3.4 固溶晶界内耗峰	(117)
§ 3.5 沉淀晶界内耗峰	(127)
§ 3.6 稀土元素在晶界的偏析和固溶	(137)
§ 3.7 掺杂对于陶瓷材料晶界弛豫的影响	(139)
参考文献	(147)
第四章 关于晶界内耗峰来源的争论	(150)
§ 4.1 争论的主题	(150)
§ 4.2 法国 Poitiers 研究组的实验	(150)
§ 4.3 意大利 Bologna 研究组的实验	(177)
§ 4.4 中国合肥研究组的实验	(193)
§ 4.5 法国里昂研究组关于超高纯 Al 的实验	(219)
§ 4.6 关于晶界内耗峰(葛峰)来源的争论的阶段性总结	(226)
参考文献	(232)
第五章 竹节晶界和双晶晶界的弛豫	(234)
§ 5.1 竹节晶界内耗峰的发现及其认定	(234)
§ 5.2 竹节晶界内耗峰的机制和宏观力学模型	(269)
§ 5.3 双晶晶界所引起的内耗峰	(274)
§ 5.4 高温淬火竹节晶界内耗峰(HT 峰)的发现及其机制	(281)
§ 5.5 关于 HT 峰的弛豫行为和反常振幅效应的进一步研究	(300)
§ 5.6 HT 峰的精细结构(HT-1 峰和 HT-2 峰)	(304)
参考文献	(311)
第六章 晶界弛豫的临界温度与晶界结构稳定性	(314)
§ 6.1 关于晶界结构稳定性问题的争论	(314)
§ 6.2 晶界局域无序化与晶界弛豫	(317)
§ 6.3 铝多晶晶界弛豫强度的滞弹性测量	(318)
§ 6.4 铝双晶晶界弛豫强度的滞弹性测量	(325)
§ 6.5 晶界弛豫滞弹性测量程序的检查和结果分析	(331)
§ 6.6 铝双晶晶界局域无序化的分子动力学模拟	(338)
§ 6.7 结语	(345)
参考文献	(347)
第七章 晶界弛豫的动力学	(349)
§ 7.1 晶界扩散	(349)
§ 7.2 晶界迁动	(363)
§ 7.3 晶界滑动	(373)

§ 7.4 晶界滑动与晶界迁动的关系	(379)
§ 7.5 晶界滑动所产生的不协调性的调节	(382)
§ 7.6 多晶体的扩散型蠕变	(394)
§ 7.7 金属薄膜的晶界内耗与晶界结构	(402)
参考文献	(408)
第八章 晶界弛豫与晶界结构	(412)
§ 8.1 引言	(412)
§ 8.2 晶界的宏观结构与晶界弛豫	(413)
§ 8.3 晶界的过渡结构与晶界弛豫	(414)
§ 8.4 界面(晶界)的原子结构和计算机模拟	(422)
§ 8.5 特殊大角晶界	(430)
§ 8.6 多晶体中的特殊晶界	(446)
§ 8.7 多晶体中的晶界特征分布与晶界内耗	(449)
参考文献	(453)
第九章 晶界位错与晶界弛豫	(456)
§ 9.1 晶界的位错模型	(456)
§ 9.2 晶界位错列阵的实验观察	(474)
§ 9.3 晶界位错的运动	(480)
§ 9.4 晶界弛豫(晶界内耗)的位错机制	(489)
参考文献	(510)
第十章 晶界结构的综合模型	(513)
§ 10.1 晶界结构与晶界的黏滞性质	(513)
§ 10.2 晶界结构的无序原子群模型	(514)
§ 10.3 晶界结构的位错模型	(515)
§ 10.4 晶界结构的重位点阵模型	(515)
§ 10.5 晶界结构的转变温度 T_0	(516)
§ 10.6 晶界结构与邻接晶体取向之间的关系	(517)
§ 10.7 晶界结构的综合模型	(518)
参考文献	(519)
人名索引	(520)
内容索引	(531)
重排后记	(541)

绪 论

《固体内耗理论基础》这本专著主要讨论固体内耗的基础理论问题，这包含着固体中的内耗是怎样产生的，它的基本物理过程是什么。通过这方面的了解，可以阐明固体的性能与固体结构的关系。

内耗研究起始于对于高或低阻尼材料的需求

可以认为，人们最初开始固体内耗研究与固体材料所表现的阻尼性能有密切联系。根据目前的认可，内耗是物体在振动中所引起的能量损耗。使物体发生振动后，如果这振动很快就停止下来，人们就说这种材料的内耗很大，是高阻尼材料。反之，如果物体的振动停止得很慢，人们就说这种材料的内耗很小，是一种低阻尼材料。人们根据实践的需要，有时需要使用高阻尼材料，有时需要使用低阻尼材料，这就提出了如何获得高或低阻尼材料的要求，从而引发了为什么有的材料具有高阻尼而有的材料具有低阻尼的问题。

内耗与滞弹性

人们多年的实验研究表明，内耗除了与材料内部的因素有关以外，还依赖于许多外部条件，这包括振动的振幅、振动的频率和材料的温度等等。因此，要求材料具有高阻尼或低阻尼性能时必须说明材料在使用当中的振动振幅和振动频率以及材料的温度，特别重要的是振动的振幅，因为振动振幅大得足以使材料发生范性形变（即永久变形）时，会产生附加的大的内耗，而这种内耗并不代表材料本身的（内禀的）阻尼性能。由于这个原因，人们测量材料的内耗时，所用的振动振幅应当不使材料发生范性形变，从而这形变是属于弹性的范围。

适用于一般弹性的胡克定律指出，应力所引起的应变与应力成正比，即应力与应变具有线性关系，并且还具单值的对应关系，这表现为：材料在受到应力时，它立即产生相应的形变，而一旦应力撤去后，它产生的应变立即回复到零值。但是人们很早就发现，有的材料却表现一种特异的性质，即当承受应力时，它并不立即产生根据胡克定律所应当达到的应变，而是随着时间的推移

缓缓地达到这个应变, 这叫做蠕变. 反之, 当撤去应力时, 所产生的应变并不立即而是缓缓地回复到零值, 这种现象被称为弹性后效. 过去人们把这种现象也叫做非弹性 (inelasticity), 但是既然这材料最终并没有发生范性形变 (永久变形), 它应当仍属于弹性的范畴. 1948 年, Zener 在他的著名的《金属中的弹性和滞弹性》专著中, 把材料的这种属性叫做 anelasticity 以与 inelasticity 有所区别. 我们把它译为“滞弹性”, 反映这种特性既属于弹性的范畴, 又包含着在时间上表现滞后现象的特点. 因此, 适用于滞弹性现象的普遍胡克定律的方程中包括应力和应变以及它们的时间微分, 不过这方程仍属于线性的, 即其中并不包括高次项.

滞弹性内耗与固体缺陷的应力诱导热激活弛豫

滞弹性概念的提出大大促进了内耗这个研究领域的发展. 它一方面指出, 大量的内耗现象实际上是材料的滞弹性的表现, 这反映着材料的内禀的阻尼性能; 另一方面指出, 内耗的产生是由于应变落后于应力, 不过应变和应力仍然保持线性关系而只是在时间上发生滞后. 应该指出, 这种“滞后”是对于时间来说的, 并不是永久的“落后”. 在国外的文献中的 hysteresis 常常包含着“滞后”(暂时的)和“落后”(永久的)两种意义, 这引起一定的混淆和概念不清. 因此, “滞弹性”概念的提出可以说是开拓了内耗理论的研究, 即提出了产生内耗的动力学过程, 并把物理学和化学上的时率理论 (rate theory) 引入内耗研究, 因而在 20 世纪 40 年代以后, 内耗研究有了极其迅速的发展.

滞弹性概念的提出使人们意识到材料的内禀阻尼性能和内耗与材料本身结构特点和结构缺陷有密切的联系. 对于晶体材料来说, 完整的结构将表现完全的弹性, 即不会引起内耗. 结构上的特点和结构上的缺陷会使得材料在承受应力时发生在微观上的结构变化. 对于原子尺度来说, 原子将从原来的一个平衡位置移动到另一个新的平衡位置, 从而引起微观的位移, 而这个过程需要一定的时间, 所以应变落后于应力. 这种由应力诱导的原子微观位移一般需要靠着热激活来完成, 从而产生滞弹性内耗的过程就是在应力的诱导下的热激活过程, 这里所说的弛豫就是原子随着时间的推移的重新排列的过程.

本书的主要内容

我们所遇到的大量的内耗与原子尺度上的晶体缺陷密切相关. 这包括点缺

陷（空位、间隙子和间隙式溶质原子和替代式溶质原子），线缺陷（位错）和界面（晶界，相界，层错），因而内耗的理论基础可以说主要指的是点缺陷弛豫、位错的弛豫和晶界（包括界面）的弛豫。在电子尺度上还应当包括电子弛豫。作为一个初步的尝试，本书将首先系统地介绍晶界的弛豫，因为晶界的结构和形态对于材料的力学性能（范性包括蠕变和疲劳、脆性、断裂……）、化学性能（氧化、偏析……）以及物理性能（电磁和光学特性……）具有重要的影响。另外，晶界与界面甚至于在一定程度与表面有许多共同的特征，对于晶界的深入了解有助于阐明界面和表面的使用性能与其结构的关系。新近关于精密陶瓷、金属间化合物、复合材料、微粒磁性、功能薄膜、纳米块体和纳米材料的重要性日益突出，这说明关于晶界和界面的深入研究不仅对于传统材料的改进和改性是十分重要的，对于发展下一代的新材料的探求和获得也将会提供有效的途径。在本书的有关章节里，将随时指出晶界弛豫和晶界滞弹性内耗的研究对于上述的新型材料的研究所能提供的重要信息。

从学术的角度来看，我国的科学工作者对于晶界弛豫和晶界内耗的研究做了大量的奠基性工作。本书将根据历史的进程系统地介绍晶界弛豫和晶界内耗研究的开拓和发展进程，以及如何用内耗测量作为主要的手段从研究晶界的性能出发来逐步阐明晶界结构与晶界性能的关系，并提出合乎实验事实的晶界模型（晶界结构的综合模型）。在这个长期的研究过程中，始终贯穿着一系列不同论点的争论。事物的发展是辩证的。在科学研究的发展中也总是贯穿着迂回曲折的过程。本书以笔者自己的观点作为主要的框架，但是也充分注意到其他研究工作者的合乎实验事实的研究成果和论点，因而全书的内容是自洽的，是一部有独立见解的关于晶界弛豫和晶界弛豫研究发展史的专著。

本书的第一章简略地介绍滞弹性弛豫和滞弹性内耗的内容。

第二章介绍晶界弛豫的早期的奠基性研究。首先详细地叙述了测量低频内耗的扭摆内耗仪和扭转线圈装置的设计和应用，因为这对于晶界弛豫研究的迅速发展起了关键性的作用。早在1947年，笔者首次用这两种仪器对于完全退火的多晶纯铝进行测量，发现了晶界内耗峰（作为温度的函数），并证明了它与另外三种滞弹性效应，即动态模量随着温度的变化（模量亏损），在恒应力下的滞弹性蠕变，在恒应变下的应力弛豫，在定量上满足根据线性叠加原理所推导出的各种滞弹性效应之间的相互关系式，从而奠定了“滞弹性”这门新学科的实验基础。另外，由于顺利地测出了晶界弛豫的激活能，从而能够定量地计算晶界滑动的速率，算出晶界滑动的黏滞系数以及它随着温度而变化的关系式，得出了在熔化温度的晶界滑动黏滞系数与大体积材料在熔点温度的黏滞

系数相等的重要结论,这就证实了晶界的黏滞滑动模型,并首次从实验上证明晶界具有内禀的黏滞性质,即它不能够维持加到它上面的切应力,而是随着时间的推移逐渐发生切应力的弛豫,而这种黏滞性服从牛顿黏滞性定律。

这一章还对晶界弛豫的特征作了进一步分析。晶界的黏滞性质导致晶界内耗曲线(作为温度的函数)随着振动频率的增加而移向较高的温度,这就提供了一种方便地测定晶界弛豫激活能的方法。另外,从晶界弛豫的形式理论出发,阐明了晶界弛豫的内部参数的物理意义及其测定方法,这包括弛豫强度、弛豫时间和上述的弛豫过程激活能,笔者在1947年所报道的关于晶界弛豫的原始性工作是用完全退火的多晶纯铝(99.991% Al)试样进行的,所用的应变振幅小于 10^{-5} 。在这种情况下所得到的试验结果基本上与晶界的滞弹性弛豫的形式理论所预期的结果相合。在随后的年代里,各方面用低频扭摆内耗仪对于各种多晶金属的晶界弛豫进行了大量研究,由于所用试样的纯度、预处理、形变类型以及在试验中的操作方式以及应变振幅各不相同,得出了关于晶界内耗峰的不同表现,从而提出了各种不同的看法,这就需要对于用不同试样在不同的条件下所观测的关于晶界弛豫的特征进行严格的剖析。

晶界弛豫的形式理论指出,如果晶界弛豫过程只包含着单个弛豫时间,则晶界弛豫强度应当等于晶界内耗峰峰值高度的两倍。笔者用纯铝所得的晶界内耗峰高度在扣除高温背景后是0.09,由此所推导的弛豫强度是0.18。但是对于纯铝动态模量测量所得的弛豫强度值是0.49,这两者差异很大。随后的实验指出,这个差别可能来源于实验上观测的晶界内耗峰的宽度大于标准滞弹性固体的晶界内耗峰的宽度,在实验上观测的晶界内耗峰实际上是包含着有一定扩展范围的一系列的弛豫时间谱,即弛豫时间具有一定的分布,弛豫时间存在一种分布使晶界内耗峰变宽,并且峰高降低。在这种情况下,就不能认为弛豫强度等于内耗峰峰值高度的两倍。Nowick 和 Berry 假定弛豫时间表现对数正态分布,求出内耗峰高度与峰宽的关系,从而求出所对应的弛豫强度。

如果晶界是完全平滑的并且不存在能够减小相邻晶粒间滑动的障碍物,则可以认为在弛豫时间内沿着晶界的宏观滑动距离随着晶粒尺寸(可看做是介于两个晶界三叉结点之间的距离)的增大而增大。晶粒尺寸越大,则弛豫时间越长,因此,弛豫时间有一个分布可能来源于晶粒尺寸的分布。但是笔者对于铝的实验结果表明,当试样的晶粒尺寸小于试样的直径时,晶粒尺寸的增大只是使内耗峰向高温移动,而内耗峰的高度不变,这也是滞弹性弛豫理论所预期的结果。随后的许多研究工作者指出,内耗峰高度对于晶粒尺寸的依赖关系相当复杂。可以认为,所谓的晶粒尺寸分布并不单单指着晶粒尺寸的大小之不同,而应当也包含着晶界的平滑程度和所含的障碍物的不同。这就是说,影响

晶界弛豫的因素是多方面的,有的是晶界本身的因素,这包括晶界尺寸的分
布、晶界的几何学构型,例如它的平滑程度,也就牵涉到晶界两边晶粒的取向
错配程度;另一方面是外在的因素,例如杂质在晶界的吸附和晶界附近存在的
位错亚结构与晶界的交互作用,这些因素都影响晶界的动性即黏滞系数,并且
牵涉到晶界弛豫激活能及指数前因子,根据这个观点可以解释文献中关于晶粒
尺寸效应的不同报道.

上述关于晶界内耗的一系列实验的一个非常重要的发现是认识到晶界弛豫
激活能与点阵扩散激活能或晶界扩散激活能的联系,这种认识为根据晶界内耗
实验推知晶界结构开辟了一条全新的道路,它第一次指出了引起晶界黏滞滑动
的结构必然是具有局域结构的某种缺陷.可把这种缺陷看成是独立的单元,而
在这种缺陷单元之间的区域则是较为完整的,这就是说,晶界在原子尺度上的
结构是不均匀的,是由一些有序的和无序的区域交迭地组成的,即由一些好区
和一些坏区组成的.笔者根据这种设想而提出了大角晶界的“无序原子群模
型”,认为大角晶界是由许多无序原子群(坏区)组成的,各个无序原子群之
间的区域是好区.晶界两侧的两个晶粒的相对宏观滑动是各个无序原子群内的
原子重新排列所引起的局域黏滞性位移的总和加上各个无序原子群之间的好区
内所发生的弹性形变.根据无序原子群模型所推导出来的晶界滑动速率和黏滞
系数公式与由宏观滑动模型所推导的在形式上一致.

第三章着重介绍杂质和合金元素对于晶界弛豫的影响,这是在早期的晶界
弛豫研究中所遇到的复杂问题.

最初的研究结果指出,含有杂质的试样使晶界内耗峰降低并向低温方向移
动,但是新近用高纯试样进行的实验却指出,纯度较高试样的晶界内耗峰出现
在较低的温度.这种相互矛盾的结果反映着杂质和合金因素出现在晶界处的状
态的不同,例如或是沉淀状态或是固溶状态,从而对于晶界弛豫的过程具有不
同的影响,这就会或多或少地改变高纯材料原来的晶界峰的高度、位置或形
状.另外,固溶状态会引起一个新内耗峰,即固溶晶界峰;沉淀状态会引起一
个新内耗峰,即沉淀晶界峰.实际的情况相当复杂,替代式溶质原子和填隙式
溶质原子的影响也不相同.关于这方面的研究报道很多,因为这不但对于晶界
弛豫机制和晶界化学具有特殊的意义,在实际应用方面也很重要.作为例子,
本章还特别介绍了稀土元素在晶界的偏析和固溶以及掺杂对于陶瓷材料晶界弛
豫的影响.

第四章着重介绍关于晶界内耗峰来源的争论.第二章介绍了笔者关于铝的
晶界弛豫的原始成果以及所提出的晶界黏滞滑动模型.这些结果基本上得到认
可,但是在细节方面需要进一步讨论.例如内耗峰高度(弛豫强度)、内耗峰