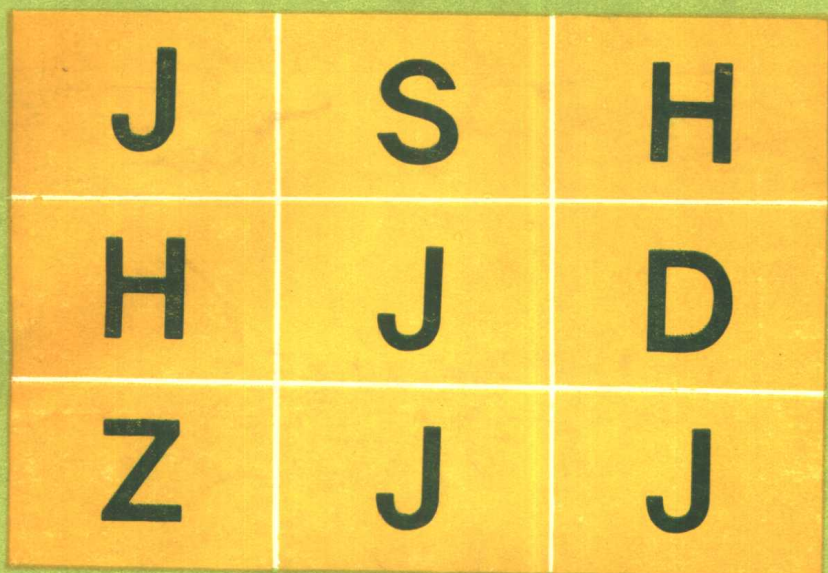




JIN SHU HE HE JIN DE ZAI JIE JING

金属和合金的再结晶

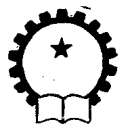
[苏] S. S. 葛列里克 著

机械工业出版社

金属和合金的再结晶

[苏] S.S.葛列里克 著

全健民 等译



机械工业出版社

内 容 简 介

本书是论述金属和合金再结晶的专著，它在全面论述金属变形及其再结晶过程和结构变化的基础上，深入分析了一次再结晶生核、核心和再结晶晶核长大过程；热变形和临界变形下再结晶机制；再结晶组织形成的主要理论以及半导体和薄膜材料再结晶的某些特点。书中引用了最新的理论概念和数据资料，并与再结晶过程有关的新材料和新工艺的发展有密切关系，因而有重要的实际意义。

本书可供从事材料科学和材料工程的科技人员阅读也可供大专以上有关专业的教师、研究生和高年级学生作教学参考。

С.С. Горелик

РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИЯ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

издательство «металлургия»

москва 1978

• • •

Recrystallization in Metals and Alloys

S.S. GORELIK

Translated from the Russian by V. AFANASYEV

MIR Publishers • Moscow 1981

金属和合金的再结晶

〔苏〕 S.S. 葛列里克 著

V·阿芬艾塞耶夫译自俄文

仝健民 等译

•

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第117号）

中国农业机械出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

•

开本 850×1168 1/32·印张 14 7/8·字数 391 千字

1985年12月北京第一版·1985年12月北京第一次印刷

印数 0,001—2,700·定价 4.30 元

•

统一书号：15033·6247

译者序

本书是有关金属和合金再结晶的一本专著。原著为苏联 С.С.Горелик 著《РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИЯМЕТАЛЛОВИСПЛ—АВОВ》，1978年修订第二版。1981年V·阿芬艾塞耶夫 (AFAN-ASYEV) 译成英文，本书根据英文版译出。

本书在全面论述金属变形和再结晶过程和结构变化的基础上，深入分析了一次再结晶生核、核心和晶粒长大、热变形下再结晶和临界变形下再结晶的机制，再结晶织构形成的主要理论以及半导体和薄膜材料再结晶的某些特点。书中引用了最新的理论概念和数据资料，反映了在这个领域中新的成就。

本书专门论述的再结晶理论是材料科学的一个重要内容，它与再结晶过程有关的新材料和新工艺的发展有密切联系。因而有着重要的实际意义。

目前，我国尚未见到这方面的专著，相信本书的译出对从事材料科学和材料工程的科学技术人员会提供有益的帮助，对这个学科领域的教师、研究生和高年级学生，本书也是一本很好的教学参考书。

本书共十五章。第一章至第五章由仝健民翻译，第六章至第十一章由李力军翻译，第十二章至第十五章由杜克敦翻译。全书由仝健民校审。

由于译者水平有限，错误之处在所难免，欢迎各方面读者予以指正。

译者

前 言

再结晶是控制结构形成^[1]和确定材料的结构敏感性能的最重要过程之一。它之所以引起人们愈来愈大的兴趣，主要是由于工业对金属和合金基本的力学、物理和工艺特性提出日益增长的需要。

这些需要通过两种途径满足：（1）靠发展新的金属塑性加工和热处理的工艺过程与技术；（2）靠发展新的合金和类似的材料。应用中与再结晶问题有联系的这类材料是值得发展的。

除去传统的材料以外，还包括具有特殊性能的合金、超塑性合金、半导体合金（热电材料、铁氧体等）以及金属和半导体的薄膜。新的工艺，如金属的形变热处理或粉末冶金在工业中获得广泛的应用。

自然，材料性能的进一步改进需要深入了解结构变化的机制及其控制的途径。

近年来，在了解再结晶的本质及先行或伴随的过程特别是回复和多边形化已取得一定的进展，这些过程，如生核机制、织构形成的某些规律等（尽管许多基本的细节仍有争议或不甚清楚）可能涉及到有关变形金属结构的许多研究^[2]。

在其它国家，最近已发表许多有关问题的综述性著作，包括关于再结晶、晶粒长大和织构形成中某些重要问题的专题论文集^[3,4,5]。在苏联也出现许多关于再结晶个别问题的综述著作^[6,7]。

遗憾的是，前一时期还没有看到一本专著能透彻地分析影响再结晶的最主要的因素及其相互作用。我们认为，这样一部专著对从事金属和合金中结构形成问题的专家以及对金属热处理和塑性加工领域中注重实际的技术人员将提供有益的帮助。它对高年

级学生和研究生也会是有用的。

这些考虑促使作者修订1967年自己首次发表的专著《金属和合金的再结晶》，并补充以最新的数据资料和自己的研究结果。由于近年来已出现大量的关于位错方面的文献，而且，位错的基本理论现在也包括在培养物理冶金和金属塑性加工工程师的高等教育机构的课程中，因此，作者有理由认为新版中可不必包括有关位错的一章。作者设想的读者是熟悉关于位错的文献以及结构晶体学、物理化学和物理冶金方面的原理的。

作者补充了与变形材料位错结构有关的几章，其中涉及到晶体类型、相组成、变形度和变形温度等。

变形织构的新概念、热变形金属的再结晶以及再结晶显微组织的各种参量对金属性能的影响都详加论述。

作者也简单地讨论了半导体和薄膜中再结晶的某些特点。

目 录

译者序

前言

第一章 再结晶的实际意义和再结晶金属组织参

量的作用.....1

1.1 关于再结晶意义和作用的概念进展..... 2

1.2 主要的显微组织参量及其对再结晶材料性能的影响..... 6

第二章 变形金属和合金的结构变化.....10

2.1 单晶体的变形.....11

2.1.1 滑移变形 11

2.1.2 孪生变形 31

2.1.3 晶格不规则旋转引起的变形 37

2.2 多晶体的变形.....43

2.2.1 变形多晶体的不均匀组织 43

2.2.2 变形织构 49

2.3 变形金属中宏观和微观不均匀性的其它影响.....55

2.4 塑性变形时金属和合金能量和性能的变化.....60

第三章 变形金属和合金加热过程的分类与驱动力.....63

3.1 回复.....65

3.1.1 点缺陷消失 65

3.1.2 多边形化 70

3.2 再结晶.....83

3.2.1 一次再结晶 86

3.2.2 晶粒长大 99

3.2.3 二次再结晶 106

3.3 回复和再结晶时金属性能的变化..... 110

第四章 一次再结晶核心形成机理..... 120

第五章 再结晶核心和晶粒长大机理..... 156

5.1 晶界结构..... 156

5.2 界面迁移速率	169
5.3 晶界张力的影响	173
5.4 退火孪晶的形成	184
第六章 热变形时的再结晶(动态再结晶)	193
第七章 临界变形下的再结晶	218
7.1 一般关系	218
7.2 “临界”变形后再结晶的机理	225
7.3 “临界”变形后再结晶长成的单晶	244
第八章 晶粒不均匀组织和粗大组织及其形成	250
8.1 具有弥散相的镍合金和铁合金	256
8.2 铝合金	269
第九章 再结晶图	282
第十章 再结晶组织	297
10.1 再结晶组织形成的主要理论	300
10.2 再结晶组织变化的主要类型	303
10.2.1 退火中变形组织的保留	303
10.2.2 再结晶各个阶段组织的变化	307
10.2.3 再结晶组织的衰减	313
10.3 电工钢再结晶时组织的形成	314
10.3.1 具有{110}<001>高斯组织的变压器钢	316
10.3.2 具有{100}<001>立方组织的变压器钢	327
10.3.3 低组织的电机钢	330
第十一章 合金化对金属和单相合金再结晶温度 范围和速度的影响	331
11.1 评定金属和合金再结晶敏感性的标准	331
11.2 金属再结晶温度范围	336
11.3 单相合金的再结晶温度范围	339
11.3.1 微量杂质对合金 t_s^0 的影响	349
11.3.2 单相合金中高浓度杂质对 t_s^0 的影响	362
第十二章 过饱和固溶体和多相合金的再结晶	369
12.1 一次再结晶和过饱和固溶体分解的相互影响	370
12.2 多相合金的再结晶	388
第十三章 化合物的再结晶	405

13·1 高熔点化合物	405
13·2 铁氧体	409
第十四章 薄膜的再结晶	417
第十五章 研究再结晶的方法	435
参考文献	456

第一章 再结晶的实际意义和再结晶金属组织参量的作用

再结晶涉及很宽范围的结构变化，这些变化是在金属或合金加热时发生的，并且引起一个相的晶粒被同一相具有较低自由能的其它晶粒所代替。

再结晶是最常见的过程，它能形成金属和合金的结构并因之能决定对结构敏感的力学和物理性能。

某些作者错误地认为再结晶仅仅是加热时改变塑性变形材料显微组织的过程。实际上，再结晶是一个更为普遍的过程，通常当金属或合金加热到大角界面可能迁移的温度就可发生再结晶。

再结晶过程几乎总是与加热发生的多晶型转变以及某些其它的相变一齐进行的。例如，在实际条件下，铁中的铁素体-奥氏体多晶型转变 ($Fe_\alpha \rightarrow Fe_\gamma$) 常以两个阶段进行，即生成与基体不同晶型的新相的核心和新相晶粒（小晶体）的长大，第一阶段靠消耗旧相；第二阶段靠消耗新相的其它晶粒。

第一阶段是相变过程；而第二阶段完全是再结晶过程，更严格地说，是晶粒长大过程。

在某些情况下，由于旧相和新相单位体积之间的差别，多晶型转变伴随有显著的体积变化。母相和新相的晶粒承受结构应变硬化。这个效应会引起相变后或甚至相变同时发生一次再结晶，之后仅仅导致晶粒长大。在很少情况下，材料加热时引起一次再结晶发生的相应变硬化不是由于多晶型转变，而是由于预先的过饱和固溶体分解；或者在更少的情况是因预先的共析转变而产生的。

这样，在经受多晶（相）型转变的金属和合金中，这些多晶转变和再结晶都会引起结构变化。

在不发生相变的材料中，形变硬化和其后的再结晶是有效改变结构的唯一的方法。

脱溶的多晶体薄膜加热时的晶粒长大通常引起组织的变化，这也是一个再结晶过程。

变形（形变硬化）材料的结构在再结晶时可在很宽范围内变化，从保留一定程度原始变形结构的部分再结晶结构到完全的再结晶结构。但是，在变形结构消失后再结晶还没有完成。在长时间的加热或者特别是在高温下加热会导致进一步的结构变化，伴随有某些晶粒靠消耗其它晶粒而长大。此过程的最终阶段，在实际中很罕见，即整个多晶的集结体转变成为一个单晶体。

在大多数的实际情况下，我们所讨论的材料是处于两类状态之间，一是变形结构消失，另一是试样完全变为单晶体。严格的条件具有重要的实际意义。

对相同的化学成份和相成份的显微组织，有时也叫做晶粒结构，可以各种参数（参见1.2节）和相应的各种性能来表示其特征。

1.1 关于再结晶意义和作用的概念进展

在早期，再结晶作为导致变形金属和合金加热时显微组织形成的过程引起了冶金学家的兴趣。因此，主要的注意力放在分析金属在变形和加热时晶粒尺寸上^[7, 8]，而只有少许重要的工作涉及过程的机制和驱动力。联系金属的晶粒尺寸和处理条件的图形叫做再结晶图。由于新合金特别是耐热合金的发展、新金属（如稀有金属和稀土金属）不断增长的应用、以及变形和加热新过程的引入，如快速加热等，建立再结晶图的工作正在继续进行。

当前应用再结晶图的趋向是不仅为了确定晶粒的绝对尺寸，而也为了获得有关结构其它参量的信息：粒度均匀性^[9, 10]、孪晶、组织的存在^[9, 11]，以及晶粒形变硬化的大小^[12, 9]。

另一方面，冶金学家和从事塑性变形的专家之所以对再结晶感兴趣，是因为把它当作引起变形金属软化和易于进一步变形的

过程。

正如早期研究所建立的,金属在再结晶绝对温度(T_r, K)和熔点(T_m, K)之间有一确定的关系。并已知,再结晶温度由 T_r/T_m 比值所确定,在各种因素的影响下会显著的变化。显然,变形金属的软化(为进一步变形所需要)可在加热至较低的温度下获得,而且,变形金属具有较低的 T_r/T_m 比值,一般说来这较为经济。随着对用于能源工程、喷气发动机及稍后的导弹工程的耐热金属提出不断增高的要求,这方面问题的重要性更为明显。

如所周知,这些新的工程分支是以愈来愈高的工作温度为特征的。在战后年代里,由于发展了能在 $1000^\circ \sim 1500^\circ C$ 工作的合金,才可能实现由活塞到喷气发动机的变化。对于火箭工程、超音速飞机、核能工程和磁流体力学需要更为耐热的材料(可用于 $2000^\circ C$ 或更高温度)。

为满足这些需要,必须不仅提高合金的熔点,而且也提高其相对的再结晶温度(T_r/T_m)和相应的软化温度。为了解决这两个相矛盾的问题——为了一个目的要降低 T_r/T_m ;而为了另一个目的则要提高 T_r/T_m ——需要深入地研究再结晶机制和能加速或阻滞过程的因素。在这方面进行了许多研究,主要是确定金属的再结晶温度及其与合金元素和处理条件的关系。在文献[1, 13~22, 300, 301]中已获得有价值的结果。

由于在多晶体金属和合金所制成的构件中物理和力学性能的有向性具有实际的重要性,所以关于再结晶结构的研究著作愈来愈增多[6, 28~28]。曾进行过大量的工作以探求在金属中形成所需类型织构的方法并特别以微量加入物分析合金化对织构类型的影响。在这个领域中持续的和成功的工作的一个明显的例子是为形成高斯织构而对变压器硅钢进行的变形和再结晶退火过程的科学研究。

对织构形成机制的研究具有极为重要的实际意义,它促进了应用局部结构分析的精细方法。这方面工作大大有助于理解再结晶一般的机制,而且首先是再结晶核心形成的机制和晶粒长大的

驱动力。

对合金，包括耐热合金，对力学性能增长的需要已引起某些亟待解决的问题。如多边形化及其与再结晶的关系^[29~31]，还有晶粒不均匀性，其影响是十分不同的，会损害力学性能^[32, 33]。在这些问题中，也有与结构粗化机制和形成粗晶粒结构有关的问题，粗晶结构是在经轻微（临界）变形后加热和在某些金属和合金中经高度变形后加热时形成的。现代技术对最完整结构单晶体日益增长的要求成为更深入研究“临界”变形后再结晶机制的附加推动力。借助形变热处理^[34~36]最充分地利用合金附加硬化的可能性的这种趋向在研究者中间引起对“热”变形（在高温）后多边形化和再结晶的问题以及在再结晶最早期阶段所形成的特殊结构的兴趣。

粉末冶金的有力进展也促进了其它方面的研究，如决定烧结动力学的晶粒长大机制以及表面张力、空位、孔隙、第二相硬质点、织构、粘结剂材料，液相和过程中其它因素的作用^[37~39]。

在近代，粉末冶金方法在由多晶半导体制造电路元件和半导体元件工艺中已获得应用。由于这些材料的晶格具有比体心立方金属和面心立方金属低的对称性，以及由于其化学键合的非金属属性，因此在这些材料中烧结和组织形成的机制有许多特点。在这个领域的研究仅仅处于开始阶段，由于这些材料是很有前途的，而且其性能对结构是非常敏感的，这些问题无疑会引起愈来愈多的注意。

电子和半导体技术愈来愈多的使用薄膜材料。这类材料的结构和性能也主要为再结晶过程所决定。此处所观察到的极为特殊的现象是由于很小的薄膜厚度急剧地增加了表面能和热蚀沟的作用，也是由于点缺陷的高度浓集。在溅射获得的多晶薄膜中，再结晶通常靠晶粒长大机制发生，在这种情况下，晶粒的起始尺寸是微米的百分之几，即比变形下的再结晶的尺寸小1~2个数量级。此外，注意到晶界和界面区具有很高的空位和显微孔隙浓度。因此，这个过程有某些尚待研究的特点。

应该记得对相变机制的深入了解曾揭示出再结晶在涉及相应变强化的相变中也起重要作用,特别是在马氏体转变、钢中的 $\alpha \rightarrow \gamma$ 转变,粗晶粒断口的形成^[40~42]和过饱和固溶体的分解中。

所列举与再结晶有关的问题远非全部。所有这些问题,主要可分成下面几组:

1. 再结晶核心的形成及长大的机制和驱动力与晶粒长大的一般机制和驱动力。

2. 变形规范、材料特性(晶体类型、化学成分和相成份)、薄膜厚度和其它因素对再结晶机制的影响。

3. 形成特殊结构的机制,包括织构、不均匀晶粒、粗大晶粒和粗化的结构。

4. 合金的化学成份和相成份对再结晶温度和速率以及对再结晶图形状影响的机制。

已经收集了大量的关于这些问题的实际的材料并建立了许多重要的关系,但是再结晶的许多方面仍需进一步解释。

在要更深入研究的问题中,有再结晶理论的某些主要方面、如在再结晶核心形成和长大中位错重新分布和交互作用的机制;高温变形下发生的再结晶;晶界和表面能在再结晶不同阶段的作用;形成不均匀晶粒和粗晶结构的机制和驱动力;形成再结晶织构的机制;微量元素提高再结晶温度的原因;提高合金再结晶温度的可能途径;在薄膜、两相合金和具有不同型式键合的材料中的再结晶。

在再结晶理论中尚未解决的问题所以有很大的差异是由许多原因造成的。

首先,变形金属位错结构的细节或者再结晶起始条件的本质,正象不同形式的晶界结构^[46~47]一样,仍然是不清楚的。在这方面不完全弄清楚就不可能理解织构形成的机制、微量杂质的作用等。

其次,再结晶过程看起来十分简单,实际上是极其复杂的,原因在于再结晶是一个由于系统的不平衡状态而发生的结构敏感

过程。再结晶过程取决于变形和加热的条件、合金的化学成分和相成份、组成物的分布和扩散迁移率、界面能、变形状态的结构和预先回复和多边形化的程度。在某些合金中，相和结构变化（固溶体分解、分散相的溶解和聚集、相变、有序化、上坡扩散等）可和再结晶同时进行。

第三，再结晶核心仅在晶格畸变方面不同于变形基体，而具有相同的化学成份和晶格类型及间距，不同于相变的情况^①。这就使得作为分析过程早期阶段的许多有效的物理和结构方法的应用变得复杂化了。

鉴于这些困难，研究再结晶的试验方法应该是多样化的，并且发展新的间接的方法以得出明显的结论。

在关于再结晶的最新研究中，以纯数学形式描述过程速率的尝试(R·F·梅尔 (Mehl), M·阿弗拉密 (Avrami) 等^[48]) 已给出分析原子和位错机制及过程物理本质和驱动力的方法^[1, 3, 4, 16]。只有研究工作中的这个方向可以对早期积累的有价值的实际材料进行有效的解释和系统化，并可能科学地控制现有的和新的合金中的再结晶过程以及这些材料中形成的结构形式和其结构敏感性能。这正是物理冶金的一个最重要任务之一。

1.2 主要的显微组织参量及其对再结晶材料性能的影响

再结晶时形成的主要的显微组织参量对再结晶材料的性能有显著的影响。这些参量是：晶粒平均尺寸 $\bar{D}$ 和亚晶平均尺寸 $\bar{d}$ ；晶粒形状；亚晶尺寸和取向差；材料不均匀粒度的特性和程度；织构的存在和形式，即在一试样中晶体取向的各向异性；晶粒外形的有向性。

在本书范围内不可能详细讨论这些参量对材料性能的影响，只能在下面分析几个典型的例子。

平均晶粒尺寸 $\bar{D}$ 实际影响所有的力学性能^[41]。例如，弹性

① 原文误为“类似于相变的情况”。——译注

极限随晶粒尺寸 $\bar{D}$ 的增加而显著地增大。在 $\bar{D}$ 和屈服强度 σ_y 和极限强度 σ_t 之间有着不同的相互关系。对许多金属和合金，在一般变形速率下， $\bar{D}$ 和 σ_y 之间的关系近似的为霍尔-佩奇(Hall-Petch)关系所描述^[49]：

$$\sigma_y = \sigma_0 + k\bar{D}^{-n}$$

或者，对具有不同亚结构的金属，

$$\sigma_y = \sigma_0 + k\bar{d}^{-n}$$

对体心立方金属和合金， $n=0.5$ 。

对具有较少可动滑移系统的金属，屈服强度 σ_y 随 $\bar{D}$ 的减小而增加得更为明显（见第二章）。

晶粒粗化减少了变形产生的加工硬化效应并显著降低塑性性能。在这方面，由于晶粒细化造成的加工硬化是有利的，它不同于变形引起的加工硬化，它不使金属变脆，相反，可增加金属的塑性。

持久强度相对于晶粒尺寸的曲线通常具有一极大值。描述 $\bar{D}$ 对疲劳抗力影响的曲线也有一极大值^[52]。

晶粒尺寸在超塑性流动（在很低变形速率、高的变形温度和超细晶粒下显示）中对屈服极限的影响与在普通变形条件的影响相反，即以 $\sigma_{ys} \approx D^a$ （ a 接近于1）的关系而不是以霍尔-佩奇关系 $\sigma_y \approx D^{-1/2}$ 来描述。

在许多高熔点金属中，韧-脆转变温度随 $\bar{D}$ 而升高^[53]。

$\bar{D}$ 也能影响金属磁性和电阻。已经证实，矫顽力 H_c 是对结构特别敏感的。

所有阻碍畴界运动和畴区磁向量旋转的因素都提高 H_c 。在铁磁体和铁氧体中，细晶粒（ $10^{-4} \sim 10^{-5} \text{cm}$ ）由于使畴界能增高通常是单畴的。因此， H_c 随晶粒尺寸增大而减小，但当 $\bar{D}$ 减小至相应于单畴状态 H_c 的尺寸时， H_c 达到一极大值。晶粒尺寸对 H_c 的影响在低的 $\bar{D}$ 值区最为明显。另一方面，晶粒细化增加 H_c ，但使 H_c 的热稳定性变坏。这个特性是许多磁性材料，特别是铁氧体中一个重要的特性。这是由于晶界和晶粒体积对 H_c 所起作用不

同，晶界的作用是和温度密切相关的。

铁氧体 H_o 的变化速度随晶粒粗化而降低。

变压器钢中总的铁损和晶粒尺寸关系曲线显示出一极大值，其位置取决于钢的制造方法（更严格说，取决于钢的纯度），并可在 $0.3\sim 1\text{mm}$ 很宽的范围内变化^[28, 54]。

晶粒尺寸也能影响金属和合金的电阻。随 $\bar{D}$ 降低，电阻平缓增大。例如，在工业纯铁中， $\bar{D}$ 减少三分之二（从 $150\mu\text{m}$ 降低到 $50\mu\text{m}$ ）， ρ 大约提高1%。

晶粒不均匀性（见第八章）一般对室温下和高温下的力学性能有不利的影 响。由镍基合金所制造的汽轮机叶片的运行特性在 $D_{\text{max}}/\bar{D}>3$ 时受到明显的损害^[52]。具有不均匀晶粒结构试样的短时和持久强度比具有均匀晶粒试样的性能低10~25%，蠕变速率相应地高3~5倍^[52]。

在滚珠轴承铬钢 $\text{III}\times 15\ominus$ 中，不均匀粒度（线状结构）降低淬火态的冲击韧性、极限弯曲强度、接触电阻和滚珠轴承的寿命^[65]。晶粒不均匀性会极大影响物理性能。例如，它会损害矩形磁滞环铁氧体的矩形度^[66]和增大低织构电机钢中的铁损^[67]。

晶粒缺陷是伴随位错堆积（亚晶界）的存在和晶界不规则形状（波纹度）而产生的。亚晶间位向差角度增大使 σ_s 增高。形成多边化结构（亚晶粒）可提高极限强度、耐热性和冲击韧性数值并使韧-脆转变温度移向低温方向。

多晶固体中的晶体织构（见第十章）对其许多性能有特别强的影响。

薄板材料对塑性变形的抗力以塑性有向性指数或轧性指数 $R\ominus$ 来表征^[3]。在各向同性材料中， $R=1$ ；在有织构的材料中， $R\neq 1$ 。当 R 增大超过1时材料的深冲性能得到改善。

在六方金属薄板中， $(0001)[10\bar{1}0]$ 织构有最大的 R 值。在

⊖ 相当于中国钢号 GCr15 。——译注

⊖ R 是薄板的宽度和厚度间相对变形之比。