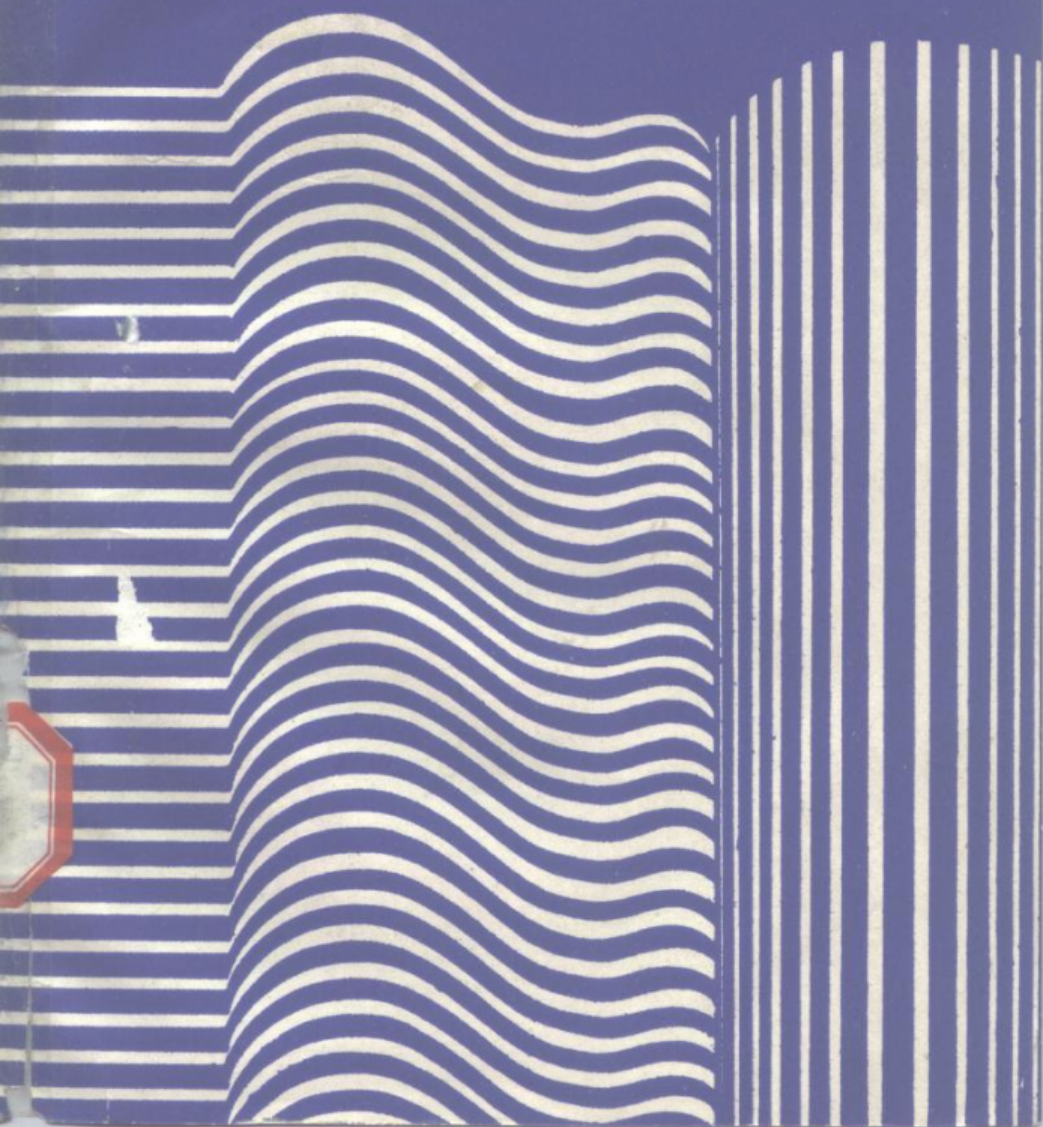


金属塑性变形

张猛 胡亚民 李先禄 编 译
重庆大学出版社



TG 301

H 30

330534

金属塑性变形

金属塑性变形理论、金属塑性变形力学、金属塑性变形工艺学、金属塑性变形物理冶金学、金属塑性变形工程应用

金属塑性变形理论 (英) R. W. K. 赫索康著

张猛 李先禄 胡亚民等译

赵仲治 校

(上)




重庆大学出版社

DV59/13
内 容 简 介

这是一本论述金属塑性变形的专著。它系统、全面地介绍了金属的结构、单晶体、多晶体的塑性变形，以及位错的基本概念，并从微观角度，以定性或定量分析的方法，对金属塑性变形时的加工硬化、蠕变、疲劳、断裂等问题作了透彻解说。内容丰富，见解独到，说理严谨，论述明白，深入浅出，易于理解。

作者 R. W. K 赫奈康是英国剑桥大学著名教授。本书自一九六八年初版以来，先后在英国、美国、澳大利亚等国多次再版重印，被视为这方面的权威著作。对从事冶金、压力加工、金属材料专业的研究人员、工程技术人员以及有关院校的教师、研究生和高年级学生，有指导作用与学习、参考价值。



金 属 塑 性 变 形
(下 册)

[英] R. W. K 赫奈康 著
张 猛 李先禄 胡亚民 等译
赵仲治 校

责任编辑：王文祥 刘天骥
重庆大学出版社出版发行
新华书店经销
重庆科委印刷厂印刷

开本：850×1168mm 1/32 印张 17.125 字数 493 千字

1989年3月第1版 1989年3月第1次印刷

印数：1—3000册

标准书号 ISBN 7-5624-0064-4

TG·2

定价（上下册）：5.60元

译 者 的 话

金属塑性成形原理，包括塑性变形力学、塑性变形物理和物理化学等方面的内容。塑性变形力学主要是分析变形体中应力、应变的大小、分布及其相互关系，研究由弹性状态过渡到塑性状态的力学条件，确定变形和变形力的求解模式。金属塑性变形物理和物理化学主要是研究晶体结构及其缺陷、金相组织、化学成份诸因素对塑性变形的作用以及塑性变形中温度、变形速度、摩擦与润滑等因素对变形过程的影响，确定由弹性状态到塑性状态过渡的条件。前者称为宏观塑性理论，后者称为微观塑性理论。

无论是宏观塑性理论，或者是微观塑性理论，都是塑性成形原理的基本组成部分，它们不仅相互联系，而且不可分割，也决不能互相代替。前者涉及到金属塑性变形的表象，容易直观感受，所以发展较早，十八世纪就已有学者开始研究，理论较成熟，国内已有较系统的论著或译著阐述。后者主要研究金属塑性变形的机理，只是在本世纪卅年代位错理论提出以后，才有了突出成就。因此，系统地从微观上，即从晶体力学、组织结构上阐述塑性变形机理的论著或译著，无论是国内国外，都十分罕见。为了能对我国塑性理论的发展及其实际应用，尽一份微薄的力量，我们把英国剑桥大学教授赫奈康（R.W.K. Honeycombe）的专著“金属塑性变形”（1984年第二版）译成中文，奉献给读者。

赫奈康教授积多年教学经验，并汇总了第二次世界大战以来的晶体学研究成果写成了本书。书中内容既注重理论的系统严密，又重视联系生产实际，每章末还给出了直到最近几年的大量参考文献。因此本书对我国读者了解近期国外关于金属塑性变形理论的应用及其发展，无疑很有裨益。

本书适于从事机械制造的冷热加工、冶金学科、材料学科及塑性理论等方面的研究人员、工程技术人员及高等学校的高年级学生、研究生和教师阅读。

本书由兵器工业部六二研究所胡亚民（译一、二、三、四章）、李先禄（译十三、十四、十五章）和武汉工学院锻压教研室赵仲治（译五、六、七章）、张猛（译前言、八、九、十、十一、十二章）等翻译，由张猛汇总。全部书稿由赵仲治校阅。

译者

一九八八年七月

前 言

近20年来，冶金学的理论基础日臻完善。位错理论无疑是最重大的发展之一，它解释了固态晶体的许多特性，特别是解释了金属塑性变形过程中的行为。虽然有人写过几本综合性著作，但似乎尚需一本教材来系统地阐述金属与合金在不同形式变形中的实际情况，并尽可能用位错理论给以解释。

本书沿用施密德 (E. Schmid) 和鲍斯 (W. Boas) 经典晶体塑性理论的处理方法，从单晶体的有关行为出发，着重介绍战后在此领域所作的大量研究。然后将上述成果用于探讨多晶体更复杂的变形现象，例如织构、蠕变、疲劳、断裂等。

本书是针对高等院校冶金学科及材料学科的大学生和研究生而写的。他们需要掌握金属塑性变形的基本概念，即要掌握金属的特性及其理论。本书解释材料性能的基本原理，对工程技术人员也很实用。所涉猎的参考资料虽不是包罗万象，但能为读者进一步阅读有关书籍提供比较详细的线索。

本书大部分是在塞菲尔德 (Sheffield) 大学写成的。作者非常感谢 A. G. Quarrell 教授和冶金系的同事们，他们进行了有益的讨论，并给作者以鼓励；对 Wendy Morton 夫人耐心地辨认手稿，并为最终打印所作的大量工作，应该特别表示感谢；非常感谢 E. O. Hall 教授阅读了手稿和提出的许多有益的意见，感谢 Brian Ralph 博士在校审时所提供的许多有益建议；感谢 Evelyn Matin 夫人在编制索引中所给予的帮助。书中插图都指明出处，感谢编辑们在这方面所给予的帮助。

最后，谨向我的老朋友 Walter Boas 博士深表谢意，是他首先建议我研究晶体变形的。

R. W. K. Honeycombe (赫奈康)

1968年于剑桥

第二版前言

在新的版本里采用了国际单位制。每章末增列了自1968年以来出版的有关文献资料。本学科的大部分内容目前变化不大，因此正文未作变动。然而，自本书第一版问世十五年来，本学科的某些领域，如蠕变、疲劳和断裂，无疑都取得了重大进展，要对此作出恰当的评价，不得不编写一本新书。但我确信，完全侧重于基本原理的这本书将为本学科今后的发展奠定基础。

最后，谨向今年年初去世的Walter Boas博士致敬，人们永远不会忘记他为我们了解金属塑性变形所作出的杰出贡献。

R. W. K. Honeycombe (赫奈康)

1982. 于剑桥

目 录

(上)

第一章 绪言	(1)
第二章 金属晶体变形的一般特性	(5)
2.1 引言	(5)
2.2 金属单晶体的制备	(5)
2.2.1 熔体凝固法	(6)
2.2.2 固态晶粒长大法	(8)
2.3 塑性变形的结晶学特征	(10)
2.4 晶体塑性变形的各向异性—滑移几何学	(14)
2.5 滑移的临界分剪应力— <i>Schmid</i> 法则	(18)
2.6 可变因素对临界剪应力的影响	(20)
2.7 剪应变的确定	(22)
2.8 金属晶体的应力—应变曲线	(24)
2.9 密排六方晶格金属晶体的几何学研究	(25)
2.10 面心立方晶格金属晶体的几何学研究	(28)
2.11 面心立方晶体的应力—应变曲线	(31)
第三章 位错理论初步	(36)
3.1 晶体的理论强度	(36)
3.2 简单位错的性质	(38)
3.2.1 刃型位错	(38)
3.2.2 螺型位错	(41)
3.3 位错环	(43)
3.4 位错上的作用力	(45)

3.5	位错运动应力	(45)
3.6	位错增殖—位错源	(46)
3.7	位错塞积	(49)
3.8	位错的实验观察	(50)
3.8.1	泡筏模型	(51)
3.8.2	晶体生长	(51)
3.8.3	腐蚀坑法	(54)
3.8.4	沉淀缀蚀法	(54)
3.8.5	薄膜透射电子显微镜法	(56)
3.8.6	场离子显微镜法	(57)
3.8.7	X射线衍射法	(58)
3.9	位错应力场	(58)
3.9.1	刃型位错应力场	(58)
3.9.2	螺型位错应力场	(59)
3.10	位错畸变能	(60)
3.11	位错线张力	(61)
3.12	位错网络	(62)
3.13	位错的非守恒运动	(64)
3.14	位错割阶	(66)
3.15	偶极子	(68)
3.16	位错间的作用力	(70)
3.16.1	平行平面上的平行刃型位错	(70)
3.16.2	平行螺型位错	(72)
3.17	密排结构位错的分解	(72)
3.18	位错和堆垛层错	(76)
3.19	位错分解的证明	(78)
3.20	不可滑位错	(81)
3.20.1	Frank位错	(81)
3.20.2	Lomer—Cottrell位错的形成	(82)

第四章 金属晶体的变形	(89)
4.1 面心立方晶格金属晶体的变形.....	(89)
4.1.1 一期硬化阶段.....	(89)
4.1.2 一期硬化阶段的显微结构.....	(96)
4.1.3 位错密度.....	(99)
4.1.4 二期硬化阶段.....	(100)
4.1.5 次级滑移在一、二期硬化阶段的作用.....	(106)
4.1.6 三期硬化阶段.....	(109)
4.1.7 三期硬化阶段的显微结构.....	(109)
4.1.8 流动应力与温度的关系.....	(114)
4.2 体心立方晶格金属晶体的变形.....	(116)
4.2.1 晶体观察.....	(116)
4.2.2 体心立方晶格金属滑移的几何模型.....	(117)
4.2.3 流动应力.....	(118)
4.2.4 体心立方晶格晶体的应力—应变曲线.....	(120)
4.2.5 体心立方晶格的位错.....	(122)
4.3 六方晶格金属晶体的变形.....	(123)
4.3.1 六方晶格的轴比.....	(124)
4.3.2 六方晶格金属的滑移结晶学.....	(124)
4.3.3 六方晶格晶体的位错.....	(127)
4.3.4 六方晶格金属的应力—应变曲线.....	(131)
4.3.5 六方晶格金属位错的观察.....	(137)
第五章 金属加工硬化理论	(146)
5.1 引言.....	(146)
5.2 早期理论.....	(146)
5.3 加工硬化的近代理论.....	(149)
5.4 流动应力理论.....	(149)
5.5 一期硬化.....	(151)

5.6 二期硬化	(152)
5.7 三期硬化	(158)
5.8 密排六方晶格金属	(159)

第六章 固溶体 (163)

6.1 溶质原子与位错的交互作用	(163)
6.1.1 弹性交互作用	(163)
6.1.2 交互作用模量	(166)
6.1.3 电的交互作用	(167)
6.1.4 化学交互作用	(167)
6.2 溶质与位错交互作用的实验验证—屈服现象	(167)
6.3 屈服点理论	(170)
6.4 固溶体晶体变形	(176)
6.4.1 固溶体的临界剪应力	(176)
6.4.2 固溶体临界剪应力与温度的关系	(180)
6.4.3 固溶体应力—应变曲线	(182)
6.4.4 固溶体中的位错	(190)
6.5 有序固溶体的变形	(192)
6.6 固溶体强化理论	(193)
6.6.1 Cottrell 钉扎理论	(193)
6.6.2 化学制约理论	(194)
6.6.3 Mott—Nabarro 理论	(195)
6.6.4 尺寸因素与模量的联合作用理论(Fleischer)	(196)

第七章 含有第二相的晶体变形 (202)

7.1 引言	(202)
7.2 位错与沉淀相的交互作用	(202)
7.3 Mott—Nabarro 合金时效理论	(202)
7.4 位错切割共格沉淀区和沉淀颗粒	(207)
7.5 位错与无共格沉淀颗粒的交互作用	(209)

7.6 时效合金的应力—应变曲线·····	(210)
7.7 含无共格沉淀物晶体的应力—应变曲线·····	(212)
7.8 弥散相对屈服应力的影响·····	(213)
7.9 温度对时效合金晶体变形的影响·····	(215)
7.10 沉淀物与位错交互作用的显微结构·····	(218)
第八章 晶体中的其它变形方式·····	(223)
8.1 引言·····	(223)
8.2 晶体不均匀变形的证明·····	(223)
8.3 六方晶格晶体的扭折·····	(224)
8.4 面心立方晶体的变形带·····	(225)
8.4.1 扭折带·····	(226)
8.4.2 二次滑移带·····	(227)
8.5 孪晶变形·····	(228)
8.6 孪晶结晶学·····	(229)
8.7 六方晶格金属的孪晶·····	(234)
8.8 体心立方晶格金属的孪晶·····	(236)
8.9 面心立方晶格金属的孪晶·····	(237)
8.10 孪晶中的位错运动·····	(241)
8.10.1 体心立方结构·····	(241)
8.10.2 面心立方结构的位错机理·····	(243)
8.10.3 六方结构·····	(244)

第一章 绪 言

塑性或经受很大变形而不破坏的能力是金属最特有的性能。甚至我们的祖先在发现天然的金、铜以及陨铁时，就知道了金属的这些性质。金确实是塑性最大的一种金属。许多世纪以来，人们就把金锻打成很薄的薄片。尽管千百年来人们就积累了金属成形的实践经验，但真正了解与变形有关的物理本质，只是在最近四十年内才有所发展。人们已经掌握了一些基本规律，但许多与这些基本规律有关的现象尚未彻底了解，还需要进一步研究。本书旨在向广大读者提供已知事实和原理的梗概，但有时也不妨对某些问题作推测性的探讨。

如果对一个固定悬挂着的金属棒施加载荷，该棒就被拉长，去掉这一载荷后，它又完全恢复原状，我们说这个棒发生了弹性变形。在弹性范围内，应力和应变之间存在着虎克定律所确定的线性关系： $E = \sigma / \epsilon$ 。在任何给定的载荷下，应力 σ 和弹性应变 ϵ 之比为一常数 E ， E 称为单轴拉伸弹性模量。然而，如果载荷超过一定的值，卸载后变形不能完全恢复，这时金属就发生了塑性变形或永久变形。我们把从弹性变形过渡到塑性变形时的应力定义为屈服应力或初始流动应力。塑性变形在变形中一般占绝对优势，弹性变形量总是很小的。工程技术人员在设计机器时，应避免机器的任何零部件承受的应力接近屈服应力，但在金属成形加工时，却需在塑性范围内工作。在本书中，我们将分别探讨金属从承受屈服应力到断裂时的性能，并通过轧制、锻造、拉拔及冲压等工艺过程来验证这些基本机理。

本世纪初，Rosenhain和Ewing指出，塑性变形的金属，其表面产生许多平行的显微台阶，这些显微台阶叫作滑移带。他们认为金属沿滑移带剪切变形，颇有点像洗纸牌时的纸牌。这些早期的观察清楚地表明，在金属内部沿着一定的晶面发生了剪切变形，其痕迹的方向在晶界处有明显变化。然而，用一般的金属试样进行详细研究是比

较困难的，因为一个晶粒就可以出现几组明显不同的变形痕迹。因而，很有必要研究单个晶粒或晶体的性能。只有用这样的方法才能简化塑性变形问题。

不久以后，*Andrade*在1919年发明了一种使熔化金属生长成大的单晶体的方法，后来经*Bridgman*精心研究，能够制备许多金属的单晶体，并且这些单晶体尺寸一致，相对于试件轴的取向范围很广。成功的制备单晶体，揭开了详细研究金属晶体塑性变形的序幕，1920~1934年间人们对晶体塑性进行了大量的实验研究，从许多普通金属变形的研究得出了一些重要的结论。例如，准确的叙述了临界剪应力准则和晶体几何学许可原理，对照比较了三种主要的晶体结构即面心立方结构、体心立方结构和密排六方结构的金属性能。这一阶段广泛研究的结果由*E. Schmid*和*W. Boas*汇编在1936年出版的有关晶体塑性的早期专题论文里。本书第二章将介绍有关单晶体变形的实验结果，第四章将根据最近的发展讨论这一主题。1945年以来，人们又做了大量新的研究工作，在某些情况下，用高纯度金属进行研究的结果，改变了早期的一些观念。

Orowan、*Polanyi*和*Taylor*在1934年分别引入了位错概念，用这种晶体的线缺陷方便地解释了实测的金属强度值一般比理论估算值约小一千倍这一事实。把位错说成是最近卅年金属物理中最重要的发现并不夸张。第二次世界大战以来，事实已成功的证实了当初提出的许多理论概念。所观测的事实不仅仅是塑性变形过程的本身，而且还有晶体生长、再结晶及其它一些现象。第二次世界大战阻碍了位错理论的发展，直到1945年才又重新研究位错理论，并在随后的十年里发展起来。位错理论的表达形式现在有许多，但可以把原理归纳起来，以便于冶金金系的学生们应用，这就是第三章的目的。第三章还描述了简单位错的类型，概述了它们的某些特征，介绍了一些说明位错实际存在的证据。在理论繁荣的十年以后，经过多次的薄膜透射电镜显微分析试验，为金属学理论研究提供了不可辩驳的证据。

加工硬化，或者说变形时金属本身被强化，大概要算是给人印象最深刻的塑性变形特性了。加工硬化是一个有待解决的非常困难的问题。

题，目前尚不能提出一个简明而又令人信服的定量理论。然而，已经证明，位错理论是一种很有用的理论，我们在第五章中予以介绍，并力图用这个理论解释实验结果。

加工硬化能导致金属强化，添加合金元素也是增加变形阻力极为有效的方法，即使是溶质原子的浓度很小，对金属晶体强度的影响也是非常大的，这是我们在第六章中所要介绍的内容。为了了解多元合金性能，必须研究固溶体和析出相中的合金元素对塑性变形过程的影响（第七章）。尽管滑移变形很普遍，但它不是产生塑性变形的唯一机理，所以我们在第八章中还要介绍孪晶变形的重要作用。

最好是用单晶体进行试验验证许多与金属力学性能有关的理论。然而，当试图用单晶体的性能解释多晶体的变形时，就出现许多问题。很明显，单晶体的变形特性可以提供某些答案，然而，由于试验本身的限制，从它们简单地推导出多晶体的性能是困难的。第九章首先介绍了晶界的作用，接着讨论了多晶体的应力—应变曲线。

空位是塑性变形的重要副产物，它常常伴随着间隙原子的形成而产生。这种点缺陷，不仅在变形过程中，而且在恢复和固态扩散时也非常重要；它们也是辐照结晶固体的直接结果，而且是决定晶体机械性能的主要因素（第十章）。

几千年来，人们就知道通过加热可以使加工硬化的金属恢复到它的初始塑性。加热发生了一系列有趣的变化，例如：变形晶体内的缺陷重新开始排列（恢复），最后由新的一组无应变晶体代替变形晶粒（再结晶）。这些现象将在第十一章中予以讨论。乍看起来，这些过程可能与研究变形无关，但如果在变形期间温度升高，就可能发生这些现象，所以是很值得重视的。

多晶体中晶粒的排列常常不是无序的，加工金属的各种方法可能引起晶粒的择优取向或织构，多晶体机械性能随方向而变化就反映出这一点。再结晶期间也能形成织构，它显著地影响着退火金属的加工性能。我们在第十二章中讨论这些问题，此外，还讨论磁性能和热性能的各向异性问题。

众以周知，在恒定应力的作用下，变形体的塑性变形量随时间而

变化，这种现象就叫作蠕变，耐蠕变合金的发展是一个重要而艰巨的领域，还需要若干年才能完善这个理论。然而，现在已经有了一个良好的开端，人们已经掌握了蠕变的一些基本特征，为观察到的现象提供一些理论基础（第十三章）。

据估计，至少有80%的金属因疲劳而破坏，即在反复的交变载荷下断裂。在疲劳条件下，金属经受不住比初始屈服应力低得多的应力的作用，这一事实无论是在理论上还是在实践上，都引起了人们的极大兴趣。近几年来，人们已经广泛地研究了金属产生疲劳时的组织变化。我们在第十四章中将简述这种形式变形的特点。长时间塑性变形的最后结果，将导致金属的破裂，第十五章将尽可能根据基本概念来讨论各种破坏的形式。在某些情况下，像钢这样一些塑性很好的金属也会在小变形下突然断裂，从而造成巨大损失，这就充分说明了脆性断裂的严重性。第二次世界大战期间，大规模地用焊接构件赶急制造的特许舰船（自由舰船），在使用中构件脆性断裂，发生了数百起灾难性的事故。钢铁材料脆性断裂的威胁如此之大，人类为之付出的代价如此之高，学者们不得不予以高度的重视，所以在大战期间和战后就开始了对它的研究。在第十五章中将阐述一些研究结果，并力图应用位错的概念来解决这一棘手的实际问题。

第二章 金属晶体变形的一般特性

2.1 引言

目前许多金属物理学方面的知识都起源于对单个金属晶体性能的了解。首先，金属单个晶体的机械性能和物理性能确定了金属多晶体的性能，因此，在我们要掌握多晶体金属性能之前，必须了解单个金属晶体的性能。其次，用多晶体试件从本质上研究某些现象是困难的，因为解释其结果相当麻烦，对于塑性变形来说尤其是这样。产生这些困难的主要原因是由于所有的机械性能和许多情况下的物理性能，例如热膨胀系数和扩散系数等等都是随着所测量的晶体之取向而改变的。换句话说，就某些性能而言，晶体是各向异性的。

1920~1935年期间⁽¹⁾⁽²⁾，人们关于金属晶体的早期研究就表明，晶体的性能随其取向而改变。例如，所有的金属，弹性性能和塑性性能都是各向异性的。表2.1列出了典型的立方晶系和非立方晶系金属的一些数据。从表中可以看出，非立方晶系的金属晶体常常表现出性能的急剧变化，例如屈服应力、延伸率和强度极限等就是这样。立方晶系的金属也表现出相当明显的各向异性。同样，磁性也随铁单晶体的取向而发生显著变化。立方晶系金属的电、热性能不随晶体的位向而变化；然而对于密排六方金属来说，例如锌、镉等，却表现出明显的各向异性。

一般说来，如果多晶体金属中的各个晶粒是无序排列的，则大多数单晶体的这些性能的变化对多晶体影响很小，因为多晶体金属性能是所有各晶粒性能的平均值，在各个方向上均为常数。然而，实际金属难得为完全无序的多晶体，而是具有织构或择优取向，或大或小地反映了单晶体金属的各向异性。

2.2 金属单晶体的制备

近年来已经发表过一些有关金属晶体生长的文章⁽⁷⁾和书籍⁽⁴⁾，