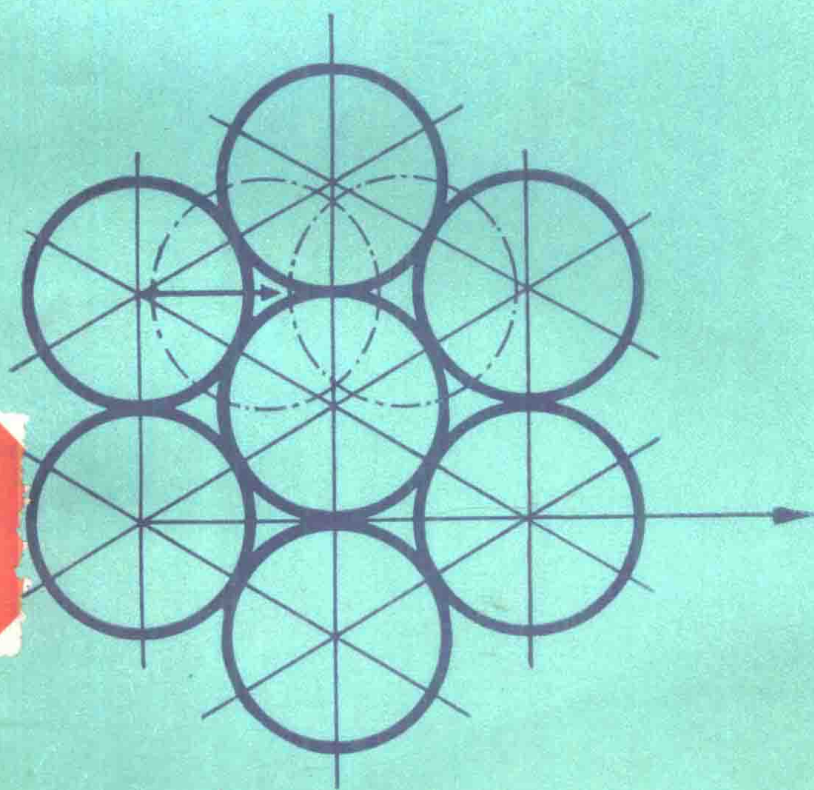


材料科学丛书

钢的组织强度学

——组织与强韧性

俞德麟 嵇有燕 编著 上海科学技术出版社



材料科学丛书

钢的组织强度学 ——组织与强韧性

俞德刚 谈育煦 编著

上海科学技术出版社

内 容 提 要

本书主要论述在常温下钢的成分、组织结构与力学性能之间的关系。书中首先讨论钢的强化因素和强化基本原理,并从强化机构观点阐述钢的力学性能本质。然后扼要介绍钢的珠光体、贝氏体、马氏体和回火马氏体的相变特征和形成过程,并对它们的组织结构和形态及其影响因素进行分析。此外还着重讨论各种组织的强度、塑性、韧性和抗疲劳性能以及控制各种性能的主要组织因素。最后论述钢的成分设计和组织设计的问题。

本书主要供高等院校和科研单位的专业人员,以及从事有关工作的工程技术人员参阅。

《材料科学丛书》

钢的组织强度学

——组织与强韧性

俞德刚 谈育煦 编著

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路 450 号)

新华书店上海发行所发行 江苏扬中印刷厂印刷

开本 80×1156 1/32 印张 15.125 字数 356,000

1983 年 12 月版 1 版 1983 年 12 月第 1 次印刷

印数: 1—5,600

统一书号: 15119·2291 定价: (科五) 2.25 元

《材料科学丛书》编辑委员会

金属材料方面

主任委员 周志宏

无机非金属材料方面

主任委员 严东生

高分子材料方面

主任委员 钱宝钧

委员(以姓氏笔划为序)

委员(以姓氏笔划为序)

委员(以姓氏笔划为序)

马龙翔 王之玺
王启东 田庚锡
师昌绪 孙珍宝
孙德和 许顺生
李 薰 李恒德
汪 显 沈华生
吴自良 杨尚灼
陈新民 杜鹤桂
张文奇 张沛霖
邹元炳 邵象华
周行健 周宗祥
周惠久 郁国城
林栋梁 柯 俊
胡为柏 钱临照
徐采栋 徐祖耀
郭可信 顾翼东
黄培云 傅元庆
蒋导江 童光照
葛庭燧 谭庆麟
魏寿昆

丁子上
干福熹
江作昭
苏 锵
吴中伟
张绶庆
袁润章
盛绪敏
黄蕴元
程继健

于 翹
王孟钟
方柏容
孙书棋
吴人洁
吴祥龙
李世璿
范 棠
张承琦
姚锡福
徐 僊
钱人元
郭钟福
姜书城

《材料科学丛书》序

无论在发展农业、工业、国防和科学技术方面,还是在人民生活方面,材料都是不可缺少的物质基础。材料的品种、数量和质量无疑是国家现代化程度的标志之一。随着材料的广泛生产和研究工作的不断深入,以及与材料有关的基础学科的日益发展,对材料的内在规律有了进一步了解,对各类材料的共性初步得到了科学的抽象,从而诞生了“材料科学”这个新的学科领域。

材料科学主要研究材料的组分、结构与性能之间的相互关系和变化规律,它是介于基础科学与应用科学之间的一门应用基础科学,与物理、化学、化工、电子、冶金、陶瓷等学科相互交叉、彼此渗透。热力学、动力学、固体物理、固体化学、化学物理等基础学科为材料科学提供理论基础,而材料科学又为应用科学提供发展新材料、新工艺和新技术的途径。

从当前来看,材料科学的发展大致有下列几方面的趋势:

(1) 高分子材料原料丰富、性能优良,在结构材料中所占的位置日益重要。塑料、合成橡胶和合成纤维比其他传统材料将有更大的发展。

(2) 功能材料显示广阔的发展前景。半导体的广泛应用,集成电路的发展,红外、激光和超导材料的发现和应用,使功能材料犹如异军突起,建立奇功。

(3) 在新能源材料方面,随着太阳能的利用,磁流体发电等的进展,出现了各种换能和储能材料,并已普遍受到重视。

(4) 对结构材料和耐磨、耐蚀等材料提出更高的要求,包括严酷的使用条件、更长的使用寿命等。

(5) 复合材料、定向结晶材料、韧化陶瓷、定向石墨以及各种类型的表面处理与涂层的利用,使材料的效能进一步得到发挥。

(6) 探索材料在极端条件下的性能,例如玻璃态金属、超低温下的金属及金属氢都具有优越的性能。

(7) 改进制备工艺,提高质量,改进设计,更有效地使用材料。

(8) 对材料科学的基础研究趋向于更加深入和细致。尤其在表面,非晶态,原子象,固态中的杂质与缺陷,一维与二维结构,非平衡态,相变的微观机制,变形、断裂和磨损等的宏观规律和微观过程以及点阵结构的稳定性等领域,探索性研究正日益活跃。

人们期望,对材料基本规律的掌握将有助于按预定性能设计材料的原子或分子组成以及结构形态等。

我国在1978~1985年科学技术发展规划中把材料科学列为重点之一。我们必须十分重视和大力发展材料科学。

为了及时传播材料科学的基础理论,总结研究成果并扩大其工程应用,以有助于更快、更广泛地提高我国材料科学技术的水平,我们成立了《材料科学丛书》编辑委员会,由上海科学技术出版社出版这套丛书。

本丛书分为金属材料、无机非金属材料和高分子材料三个方面,选题包括材料科学的基础理论,研究方法和测试技术,研究成果,以及实际应用等方面。热忱地期望我国广大科学工作者,共同策进本丛书的编辑、出版工作,努力为我国早日实现四个现代化贡献力量。

《材料科学丛书》编辑委员会

一九七九年十二月

前 言

材料的力学性能主要取决于其内部组织结构,因此探求其间的变化规律是材料科学工作者的重要任务。多年来,工程技术界已经在材料(特别是金属材料)的宏观力学性能方面积累了相当丰富的实用数据,但很多本质问题还没有得到满意的解释。这首先是由于对材料的微观组织结构本身以及在各种工艺处理过程中组织结构的变异还没有完全鉴认清楚;其次是由于强化机构与组织结构的交互作用错综复杂,一时难以得到正确和全面的认识。近年来各种先进的测试仪器和精确的测试技术在材料科学上的应用,以及材料科学的物理基础学科(如金属物理、固体物理、金属学和工程力学等)在某些领域中的进展,为研究材料的力学性能与组织结构的变化提供了有力支持。经过近二十多年来材料科学工作者的努力,有关这方面的研究已取得可喜的成果。

研究材料宏观力学性能与微观组织结构的变化规律是出于生产实际的需要。宏观力学性能是内部微观组织结构状态的外部表现,而微观组织结构是宏观力学性能主要的内部根据(化学成分对力学性能也有直接的作用)。只有充分认识这个规律,又在工程上予以科学的运用,才能获得所要求的组织结构和性能。可以预言,在不久的将来,能够实现按指定的性能来设计材料的化学成分和组织结构,并在工程上取得实用的效果。

金属材料组织结构和力学性能之间的变化关系的科研工作目前尚处于发展阶段,各研究者的出发点又往往不同,因此在阐述和分析问题时常各有侧重。从事组织结构的研究者习惯以论述金属材料的组织结构为主而以力学性能的分析为陪衬;从事力学性能的研究者则乐于用数学处理的方法来探讨各强度指标间的变化规

律而对内部组织结构的讨论便过于简单。本书试图对钢的强度、塑性、韧性以及断裂行为与组织结构之间的变化关系作一综合的阐述和分析,并定名为“钢的组织强度学”。这是初次尝试,难免存在不少缺点。但就尝试本身而言,大概是不无意义的,因为没有这个尝试,便得不到以后进一步修正、提高的基础,而且这是金属材料研究发展到一定阶段后必须完成的一项重要工作,它或可为设计钢的成分和组织提供某些参考资料,或可为从事这方面研究的科学工作者提供研究问题的线索。

本书着重讨论的钢的微观组织结构,主要是指在光学显微镜下所观察到的钢中各组成相的形态和分布,以及在电子显微镜下所显示的组织形态、亚结构和晶体结构;宏观力学性能则包括常温的强度、塑性、韧性和疲劳强度等。本书除了讨论一般的强化机构和力学性能之间的关系外,还论述珠光体、马氏体、贝氏体以及它们的混合组织的强度、塑性和韧性的问题。为便于分析组织起见,对钢在热处理过程中的组织转变问题亦作扼要的论述。应该指出,钢的组织强度学是一门发展中的学科,本书所收集到的各类描述强塑性关系的表达式大都是经验的或半定量的,有的数据和观点带有局限性,甚至是相互抵触的,因此很多内容尚待今后进一步研究并不断充实和修正。

由于我们识浅见陋,书中定有分析错误和理解片面之处,如蒙匡正和提出意见,至为感激。

作者 1980年12月

目 录

第一章 钢的微观强化机构	1
第一节 概述	1
第二节 微观强化机构分类	2
第三节 位错强化	3
第四节 固溶强化	10
一、间隙式固溶强化	11
二、置换式固溶强化	12
三、置换式强化和间隙式强化的复合作用	14
四、奥氏体的固溶强化	14
第五节 晶界强化	15
第六节 沉淀和弥散强化	19
第七节 spinodal 分解引起的强化	23
第八节 有序化强化	26
第九节 相变强化	28
第十节 弱化现象	28
一、固溶弱化	28
二、由孪晶造成的弱化	28
三、交变应力下的弱化	30
参考文献	31
第二章 钢的力学性能与强化因素	33
第一节 各种强化因素和塑性、韧性之间的关系	33
一、位错强化和塑性、韧性的关系	36
二、晶界强化和塑性、韧性的关系	38
三、固溶强化和塑性、韧性的关系	43
四、第二相沉淀强化和塑性、韧性的关系	45

第二节 各种强化因素和断裂韧性的关系	46
一、晶界和平面应变断裂韧性 K_{Ic} 值之间的关系	47
二、第二相质点对 K_{Ic} 值的影响	52
三、位错、孪晶、固溶元素以及杂质元素对 K_{Ic} 值的影响	55
第三节 各种强化因素和疲劳强度之间的关系	56
一、疲劳过程和钢的组织	56
二、晶粒大小对疲劳过程的影响	64
三、第二相质点对疲劳过程的影响	67
四、位错在疲劳过程中的作用	68
五、固溶强化对疲劳过程的影响	73
参考文献	73
第三章 珠光体的组织结构和性能	76
第一节 钢的珠光体相变	76
一、珠光体转变机构	76
二、珠光体转变动力学	86
第二节 钢的珠光体组织形态和亚结构	91
一、珠光体的层片间距和晶团	91
二、关于珠光体与奥氏体的相界面问题	96
三、珠光体的渗碳体组织形态和亚结构	97
四、珠光体的铁素体组织形态和亚结构	98
第三节 珠光体组织的强度、塑性和韧性	100
一、珠光体组织的静强度	100
二、珠光体组织的塑性和韧性	110
三、珠光体组织的断裂	115
第四节 珠光体组织的疲劳强度及疲劳破坏机构	125
一、珠光体组织的疲劳强度	125
二、珠光体组织的疲劳破坏机构及其控制因素	127
参考文献	138
第四章 马氏体的组织结构和性能	140
第一节 钢的马氏体相变	140
一、马氏体转变机构	140

二、马氏体转变的表象理论	155
三、马氏体相变的其它特点	156
第二节 马氏体的形态和亚结构	158
一、两类不同形态的马氏体	159
二、奥氏体化温度对马氏体形态的影响	175
三、影响马氏体亚结构的因素	179
第三节 马氏体的回火	187
一、回火的四个阶段	187
二、马氏体回火的准备阶段	189
三、回火第 I 阶段	193
四、回火第 II 阶段——残余奥氏体分解	200
五、回火第 III 阶段—— α 、 θ 碳化物的形成	201
六、合金钢马氏体的回火过程及二次硬化	204
第四节 马氏体钢的强度、塑性和韧性	208
一、决定马氏体强度的因素	208
二、位错和孪晶对马氏体韧性的影响	216
三、回火状态下马氏体钢的力学性能	219
第五节 马氏体钢的疲劳强度	268
一、马氏体钢中疲劳裂纹的形成过程	268
二、马氏体钢的疲劳裂纹扩展性能	279
参考文献	303

第五章 贝氏体的组织结构和性能309

第一节 钢的贝氏体相变	309
一、贝氏体相变效应	309
二、贝氏体转变动力学	324
三、关于贝氏体相变问题的讨论与争辩	328
第二节 钢的贝氏体组织结构	329
一、上贝氏体组织结构	329
二、下贝氏体组织结构	334
第三节 贝氏体组织的强度、塑性和韧性	338
一、贝氏体组织的强度及其控制因素	338
二、贝氏体组织的塑性及其控制因素	349

三、 贝氏体组织的韧性	353
四、 贝氏体的组织与断裂	357
第四节 贝氏体组织的疲劳强度	360
参考文献	364

第六章 混合组织的力学性能368

第一节 马氏体-铁素体混合组织的力学性能	368
一、 复相钢的强度、塑性和韧性	368
二、 马氏体-残留铁素体两相混合组织的强度、塑性和韧性	382
三、 马氏体-铁素体混合组织的疲劳特性	382
第二节 马氏体-贝氏体混合组织的力学性能	401
一、 马氏体-贝氏体混合组织的强度和塑性	401
二、 马氏体-贝氏体混合组织的韧性	410
三、 马氏体-贝氏体混合组织的疲劳强度	421
参考文献	423

第七章 钢的组织 and 成分设计425

第一节 铁素体-珠光体钢	425
一、 低碳铁素体-珠光体钢	425
二、 中、高碳铁素体-珠光体钢	433
第二节 贝氏体钢	436
一、 低碳贝氏体钢	436
二、 高碳贝氏体钢	442
第三节 马氏体钢	443
一、 强化机构	444
二、 成分设计	451
三、 韧化	451
四、 高强韧马氏体钢的设计要素	453
第四节 复相钢	453
第五节 马氏体时效钢的成分和组织分析	455
一、 特点	455
二、 马氏体时效钢的强化机构	455
三、 马氏体时效钢的强韧性	459

第六节 形变热处理钢的成分和组织分析	461
一、 特点	461
二、 形变热处理钢的强化机构	461
三、 形变热处理强化机构的迭加	467
参考文献	467

第 一 章

钢的微观强化机构

第一节 概 述

金属材料的强化可以通过两个基本途径：制成无缺陷的完整晶体，使金属的晶体强度接近理论强度；或者在有缺陷的金属晶体中设法阻止位错的运动。

早在本世纪二十年代人们就利用简单立方晶体的模型进行近似计算，得到的理论剪切屈服强度数值上约为切变模量 μ 的 $\frac{1}{6}$ 。若对计算时用的正弦应力场模型进行修正，可以认为金属晶体的理论剪切屈服强度约在 $\frac{\mu}{10} \sim \frac{\mu}{30}$ 之间。

α -Fe 切变模量平均值是 8000 kg/mm^2 ，它的理论剪切屈服强度大约是 $800 \sim 270 \text{ kg/mm}^2$ ，单向拉伸时 $\sigma = 2\tau$ ，拉伸理论屈服强度为 $1600 \sim 540 \text{ kg/mm}^2$ 。

五十年代制造出的铁晶须，它的屈服强度 σ_y 已接近 α -Fe的理论屈服强度。直径 $\leq 0.001 \text{ mm}$ 的铁晶须，沿 $[111]$ 方向拉伸，按 $\{112\} \langle 11\bar{1} \rangle$ 滑移系滑移， $\tau_y = 600 \text{ kg/mm}^2$ ($\sigma_y = 1200 \text{ kg/mm}^2$)，沿 $[100]$ 方向拉伸，按 $\{110\} \langle 1\bar{1}1 \rangle$ 滑移系滑移， $\tau_y = 300 \text{ kg/mm}^2$ ($\sigma_y = 600 \text{ kg/mm}^2$)，分别相当于 $\frac{\mu}{15}$ 和 $\frac{\mu}{30}$ 。晶须的直径增大，屈服强度降低。细晶须中只含有一至数条位错线，受力时位错很容易逸出表面，此后变形过程中晶须内事实上不存在位错，晶体必须通过均匀地形成位错圈才能变形，均匀形成位错圈的应力远高于位错的晶格阻力，使晶体的屈服强度接近理论屈服强度。晶须直

径变粗,内部位错不容易清除,屈服时只要克服位错的晶格阻力,使强度下降^[1]。位错的晶格阻力可近似地看作派-纳(Peierls-Nabarro)力。

上述讨论说明晶须的强度极不稳定,有一定数量位错存在时,强度激烈下降。因此,在工程上宁可采用第二种强化方法,即在晶体中引入大量缺陷及阻止位错运动来提高强度。如图 1-1 所示,采用各种强化手段后可使铁的强度提高,这些手段包括固溶强化、晶界强化、加工硬化、第二相沉淀和弥散强化以及相变强化等^[2]。

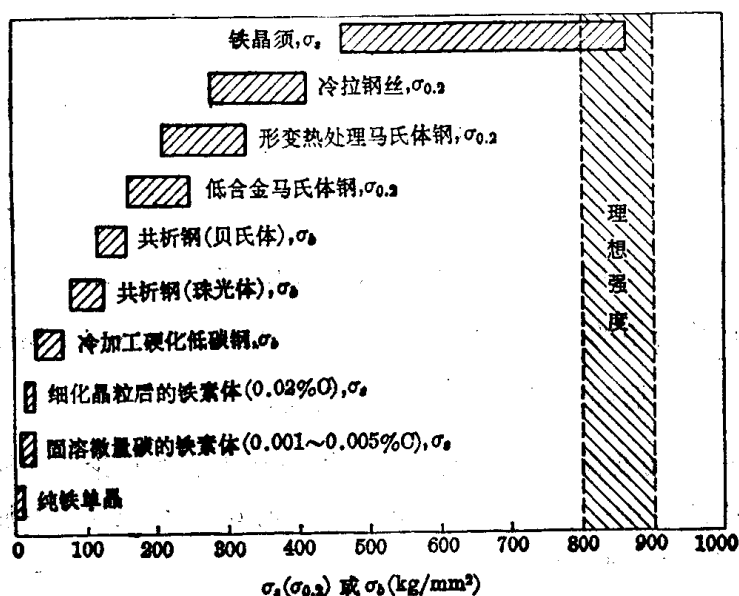


图 1-1 纯铁和钢的强度与理想强度的比较;各种强化方法对铁强度的影响

形变热处理和冷拔高碳钢丝的强度已接近晶须的强度。

第二节 微观强化机构分类

钢铁材料的强化主要由下列几类强化机构所决定: (1)位错强化; (2)固溶强化; (3)晶界强化; (4)沉淀和弥散强化; (5)spinodal 分解强化; (6)有序化强化; (7)相变强化等。实用钢的强化并不是

由单一的强化机构来决定的,在大多数情况下,它的强度是由几种强化机构迭加而获得的。例如退火状态的单晶体纯铁屈服强度约为 3 kg/mm^2 ; 铁中固溶有 O 、 Mn 、 N 等元素并制成多晶体,即普通的低碳钢,屈服强度为 $10 \sim 20 \text{ kg/mm}^2$ 。假如通过冷加工变形引入位错并在一定温度下时效,使碳化物和氮化物在钢中沉淀,则强度还可以进一步提高。这个例子粗略地说明了固溶强化、晶界强化、加工变形(引入位错而强化)和沉淀弥散强化四种基本强化机构的复合作用,使纯铁单晶体的强度提高了 7 倍以上。

研究一个具体钢种时,要把各种基本强化机构严格地孤立出来进行讨论是十分困难的。几十年来虽然进行了大量的研究工作,但是绝大部分钢种的强化增量至今尚不能定量计算。因此,本书仅简要地介绍各类强化机构的基本特点,以求对钢的强化本质有一个概括的了解。

第三节 位 错 强 化

金属晶体中的位错是由相变和塑性变形引入的,位错密度愈高,金属抵抗塑性变形的能力就愈大。其它因素固定时,金属的流变应力 τ_i (宏观的意义是单晶体开始滑移所需的应力,或多晶体开始塑变的应力) 和位错密度 ρ 之间的关系服从 Bailey-Hirsch 式:

$$\tau_i = \tau_0 + \alpha \mu b \rho^{\frac{1}{2}} \quad (1-1)$$

式中 τ_0 等于位错密度为零时的流变应力, α 是一常数, μ 是切变模量, b 是柏氏矢量。

所以, $\Delta \tau_i = \tau_i - \tau_0 = \alpha \mu b \rho^{\frac{1}{2}}$ 表示位错密度引起的流变应力增量。

金属单晶体受力时,晶体内部位错大量增殖,位错增殖引起塑性变形。根据计算,塑性应变变量 ϵ 和位错密度成正比。由 Bailey-Hirsch 式,已知 $(\tau_i - \tau_0)$ 和 $\rho^{\frac{1}{2}}$ 成正比,利用参数 ρ 可把流变应力 τ_i 和塑性变形量 ϵ 二者联系起来,即:

$$\tau = f(\varepsilon) \quad (1-2)$$

这就是金属单晶体的应力-应变曲线方程式。

在理论上，位错强化可以通过金属单晶体的加工硬化曲线说明。图 1-2 是一条具有代表性的面心立方金属单晶体加工硬化曲线。曲线分成三个阶段。利用标准的极射投影图，可以很好地说明每一硬化阶段的取向关系。

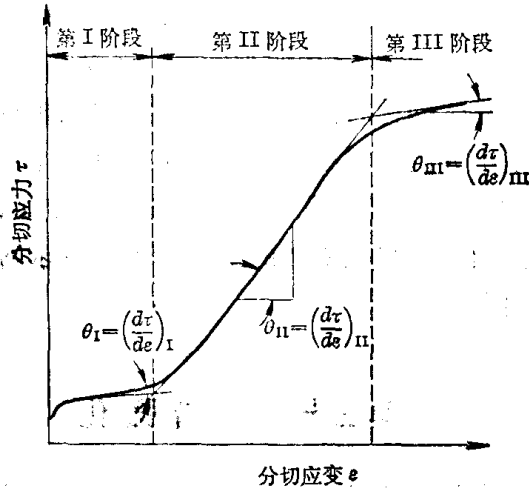


图 1-2 典型的金属单晶体的加工硬化曲线

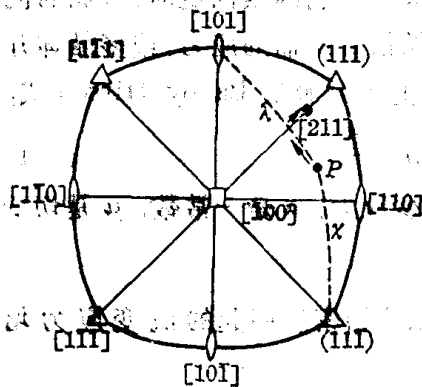


图 1-3 面心立方单晶体的标准极射赤面投影图(P 点是拉伸轴的投影; 箭头表示塑变时拉伸轴和晶面、晶向之间相对位置变化的趋势)

图 1-3 是面心立方金属的 [100] 标准投影，主滑移系是 $(11\bar{1})$ [101]，P 点是拉伸轴的方向， λ 是拉伸轴与滑移面法线的夹角， χ 是滑移方向 [101] 和拉伸轴之间的夹角。拉伸过程中，滑移面和滑移方向相对于拉伸轴发生转动， λ 变小， χ 变大，P 点沿 [101] -P 所在大圆向 [101] 方向靠近，这就是加工硬化第 I 阶段。由图可知，这个阶段中只有一个分切应力最大的主滑移系开动，所以加工硬化率 θ_I 比较小，位错移动