

高等学|校|教|材|

工程材料测试技术

盛国裕 编著
冯美斌 审

GONGCHENG CAILIAO
CESHI JISHU



中国计量出版社

CHINA METROLOGY PUBLISHING HOUSE



高等学校教材

工程材料测试技术

盛国裕 编著
冯美斌 审

中国计量出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

工程材料测试技术/盛国裕编著. —北京: 中国计量出版社, 2007. 2
高等学校教材
ISBN 978-7-5026-2568-9

I. 工… II. 盛… III. 工程材料—测试—高等学校—教材 IV. TB302

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 156311 号

内 容 提 要

本书以金属材料为测试对象, 以国家标准为依据, 着重介绍材料各种力学性能指标和材料内部的化学成分、金相组织、表面和内部缺陷的测试技术及试验方法。同时还介绍力学性能指标的本质、物理概念、实用意义和各种力学性能指标之间的相互关系, 以及材料在各种服役条件下的失效现象和微观机理。主要内容为: 静拉伸试验、扭转试验、弯曲试验、压缩试验、疲劳试验、磨损试验和硬度试验, 冲击韧性、断裂韧性和高温力学性能测试, 以及化学成分分析和金相分析。

本书可作为高等院校相关专业的教材或参考用书, 亦可供材料测试及检验等技术人员参考。

中国计量出版社出版

北京和平里西街甲 2 号

邮政编码 100013

电话 (010) 64275360

<http://www.zgjl.com.cn>

北京市密东印刷有限公司印刷

新华书店北京发行所发行

版权所有 不得翻印

*

787 mm×1092 mm 16 开本 印张 15.5 字数 352 千字

2007 年 2 月第 1 版 2007 年 2 月第 1 次印刷

*

印数 1—3 000 定价: 28.00 元



FOREWORD

当今世界在工程上使用的材料品种繁多、性能各异，据粗略统计，目前世界上的材料总和已达 40 余万种，并且每年还以约 5% 的速率在增加。工程材料主要是指结构材料，即用于机械、车辆、船舶、建筑、化工、能源、仪器仪表、航空航天等工程领域中的材料，也包括一些用于制造工具的材料和具有特殊性能（如耐蚀、耐高温等）的材料。根据材料内部结合键的性质，一般将工程材料分为四大类：金属材料、高分子材料、陶瓷材料和复合材料，其中应用最广的是金属材料（特别是黑色金属——钢铁）。据有关资料介绍，今后在相当长的时间内，金属材料（由于其优良的使用性能和工艺性能）仍然将是主要的工程材料，高分子材料、陶瓷材料和复合材料在工业中的应用不会超过 7%~8%。因此，本书涉及的工程材料主要是指金属材料。

任何一种工程材料，不管是金属材料、无机非金属材料、高分子材料、复合材料，还是其他特殊材料，能否在工程中得到实际应用，取决于该材料是否具有良好的使用性能。材料的使用性能主要包括物理性能、化学性能、工艺性能和力学性能，对于结构材料而言，其中最重要的是力学性能。材料的力学性能是指材料在外加载荷（静载荷、冲击载荷、交变载荷）作用下，或载荷与环境因素（温度、介质和加载速度）联合作用下，抵抗变形和断裂的能力。当材料对变形和断裂的抵抗力与服役条件不相适应时，则材料将失去预期的使用功能而损坏，即产生所谓的“失效现象”。常见的失效现象有过量弹性变形、过量塑性变形、断裂、磨损、疲劳、蠕变等。为此，材料的力学性能又可称为材料的失效抗力。

材料力学性能的优劣通常用力学性能参量（包括强度、硬度、塑性、韧性、耐磨性和缺口敏感性等）来衡量；具体可通过力学性能指标（表征材料力学行为的力学参量临界值或规定值）的测试来评定。此外，因金属材料的力学性能主要取决于材料内部的化学成分、组织结构、表面和内部缺陷等内在因素，所以也可通过化学成分分析和金相分析，对金属材料的内在质量及其力学性能进行评价。

本书以金属材料为测试对象，以国家最新标准为依据，着重介绍

材料各种力学性能指标和材料内部的化学成分、金相组织、表面和内部缺陷的测试技术及试验方法。同时还介绍力学性能指标的本质、物理概念、实用意义和各种力学性能指标之间的相互关系,以及材料在各种服役条件下的失效现象及微观机理。

本书内容全面,通俗易懂,实用性强,并注重最新标准在测试技术中的贯彻,力求专业理论与生产实践紧密结合,使本书既可作为专业技术书籍供有关技术人员参考,也可作为高等院校相关专业师生的教材或参考用书。全书由中国计量学院盛国裕副教授撰写,东风汽车工业总公司工艺研究所总工程师冯美斌教授审校。

由于作者水平所限,书中错漏之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

作者
2007年1月

目 录

CONTENTS

第一章 金属的变形与断裂

- 第一节 弹性及弹性变形 / 1
 - 一、金属的弹性变形 / 1
 - 二、金属的弹性模量 / 1
 - 三、金属的弹性比功 / 2
- 第二节 塑性变形 / 3
 - 一、金属的塑性变形 / 3
 - 二、金属的理论屈服强度和实际屈服强度 / 3
 - 三、塑性变形机理 / 4
 - 四、提高屈服强度的方法 / 6
- 第三节 断裂 / 7
 - 一、断裂类型 / 7
 - 二、断裂机理 / 8
 - 三、断裂抗力 / 11

第二章 静拉伸试验

- 第一节 拉伸的基本概念 / 13
 - 一、拉伸图和应力—应变图 / 13
 - 二、条件应力与真实应力 / 15
 - 三、条件应变与真实应变 / 15
 - 四、应力状态软性系数 / 16
- 第二节 拉伸力学性能指标及其测定 / 17
 - 一、拉伸试样 / 17
 - 二、强度指标及其测定 / 18
 - 三、塑性指标及其测定 / 23

第三章 其他静载下的力学性能试验

- 第一节 扭转试验 / 26
- 一、扭转试验的特点和应用 / 26
 - 二、扭转试验 / 27
 - 三、扭转力学性能指标及其测定 / 27
- 第二节 弯曲试验 / 31
- 一、弯曲试验的特点和应用 / 32
 - 二、脆性材料的弯曲试验 / 32
 - 三、塑性材料的弯曲试验 / 35
- 第三节 压缩试验 / 39
- 一、压缩试验的特点和应用 / 39
 - 二、端面摩擦力对试验结果的影响 / 40
 - 三、单向压缩试验 / 40
 - 四、多向不等压缩试验 / 45

第四章 疲劳试验

- 第一节 疲劳的基本概念 / 47
- 一、变动载荷 / 47
 - 二、循环应力 / 48
 - 三、疲劳种类 / 49
 - 四、疲劳曲线和疲劳极限 / 49
- 第二节 疲劳抗力指标及其测定 / 52
- 一、疲劳极限的测定 / 53
 - 二、不同应力状态下的疲劳极限 / 56
 - 三、疲劳极限和静强度之间的关系 / 57
- 第三节 疲劳破坏机理 / 57
- 一、疲劳裂纹的形成 / 57
 - 二、疲劳裂纹的扩展 / 60
 - 三、疲劳断口的宏观特征 / 61
- 第四节 低周疲劳与热疲劳 / 62
- 一、周期应力及应变 / 63
 - 二、低周疲劳曲线 / 65
 - 三、热疲劳 / 65

第五章 冲击试验

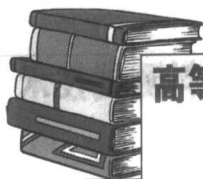
- 第一节 金属在冲击负荷下的变形和断裂 / 67
 - 一、加荷速度与变形速度之间的关系 / 67
 - 二、冲击负荷下金属变形与断裂的特点 / 67
- 第二节 金属夏比缺口冲击试验 / 68
 - 一、金属夏比缺口冲击试验 / 68
 - 二、夏比缺口冲击试验在生产实践中的应用 / 71
- 第三节 多次冲击试验 / 74
 - 一、多次冲击试验的原理和方法 / 74
 - 二、多次冲击抗力的变化规律 / 75
 - 三、多次抗力变化规律的应用 / 75

第六章 磨损试验

- 第一节 摩擦和磨损 / 76
 - 一、摩擦 / 76
 - 二、磨损及耐磨性 / 76
- 第二节 各类磨损的特点和基本规律 / 77
 - 一、磨损分类简介 / 78
 - 二、外界条件对磨损的影响 / 84
- 第三节 磨损试验方法 / 86
 - 一、磨损试验机 / 86
 - 二、环块型磨损试验 / 87
 - 三、磨损量的测量方法 / 90
- 第四节 接触疲劳 / 92
 - 一、接触应力 / 92
 - 二、接触疲劳试验的一般规律 / 95
 - 三、接触疲劳破坏机理 / 95
 - 四、接触疲劳试验 / 98

第七章 断裂韧性测试

- 第一节 线弹性条件下的断裂韧性 / 106
 - 一、裂纹扩展的基本形式 / 106
 - 二、应力场强度因子 K_I 及断裂韧性 K_{IC} / 107
 - 三、裂纹扩展能量释放率 G_I 及断裂韧性 G_{IC} / 114
- 第二节 弹塑性条件下的断裂韧性 / 116



一、 J 积分原理及断裂韧性 J_{IC} / 117

二、裂纹尖端张开位移 δ 及断裂韧性 δ_c / 124

第三节 断裂韧性在工程中的应用 / 130

一、判断材料的脆断倾向 / 130

二、材料选择 / 132

三、失效分析 / 132

四、安全性校核 / 133

第八章 高温力学性能试验

第一节 蠕变极限及其测定 / 135

一、蠕变现象 / 135

二、蠕变规律 / 135

三、蠕变极限及其测定方法 / 136

第二节 持久强度及其测定 / 141

一、持久强度的基本概念 / 141

二、持久性能指标的测定 / 142

第三节 金属蠕变变形和断裂机理 / 144

一、金属蠕变变形的机理 / 144

二、金属蠕变断裂的机理 / 144

三、提高金属材料在高温下抗蠕变变形和断裂的能力 / 146

第四节 其他高温机械性能 / 146

一、高温短时拉伸性能 / 146

二、高温硬度 / 147

第九章 硬度试验

第一节 布氏硬度试验法 / 148

一、布氏硬度试验原理 / 149

二、布氏硬度的试验过程 / 150

三、试验结果的记录和处理 / 152

四、布氏硬度试验注意事项 / 152

五、布氏硬度值与抗拉强度之间的关系 / 153

第二节 洛氏硬度试验法 / 154

一、洛氏硬度试验原理 / 154

二、洛氏硬度的试验过程 / 155

三、试验结果的记录与处理 / 157

	四、洛氏硬度试验注意事项	/	157
第三节	维氏硬度试验法	/	158
	一、维氏硬度试验原理	/	159
	二、维氏硬度的试验过程	/	160
	三、试验结果的记录与处理	/	164
	四、维氏硬度试验注意事项	/	165
第四节	里氏硬度试验法	/	165
	一、里氏硬度试验原理	/	166
	二、里氏硬度试验过程	/	167
	三、里氏硬度试验注意事项	/	169
第五节	锉刀检测硬度	/	169
	一、检测过程	/	170
	二、试验结果的记录	/	172
	三、试验注意事项	/	172
第六节	划痕和测试笔检测硬度	/	172
	一、划痕硬度试验方法	/	172
	二、金属的划痕硬度与强度之间的关系	/	175
	三、硬度测试笔检测硬度	/	176
第七节	高温和低温硬度试验法	/	177
	一、高温硬度试验方法	/	177
	二、低温硬度试验方法	/	182

第十章 化学成分分析和金相分析

第一节	化学成分分析	/	184
	一、碳的测定	/	184
	二、硫的测定	/	185
	三、磷的测定	/	185
	四、锰的测定	/	186
	五、硅的测定	/	187
	六、铬的测定	/	187
	七、镍的测定	/	188
	八、铜的测定	/	188
	九、钼的测定	/	189
	十、氧的测定	/	190

十一、光电发射光谱法 / 190

第二节 金相分析 / 191

一、金相显微镜 / 191

二、金相显微镜的主要光学零件 / 192

三、金相试样的制备 / 196

四、金相组织的识别 / 208

五、金相检验项目及结果评定 / 213

附录

附录 A 布氏硬度试样最小厚度表 / 233

附录 B 里氏硬度修正值 / 234

附录 C 常用的金相组织腐蚀剂 / 235

参考文献 / 237

第一章

金属的变形与断裂

工程材料的力学性能是指材料在外力作用下所表现出的行为，主要有弹性、塑性、韧性、刚度、强度和硬度等。此外，还包括材料在外力作用下，所产生的疲劳、磨损和蠕变等现象。由于工程中所使用的材料以金属为主，所以下面以金属为例来介绍材料的力学性能。金属在外力作用下，首先发生弹性变形，当外力超过弹性极限时，除继续发生弹性变形外，同时发生塑性变形，而达到断裂强度后则发生断裂。本章将分别讨论金属的弹性变形、塑性变形、断裂及其机理。

第一节 弹性及弹性变形

一、金属的弹性变形

弹性是指受力物体在外力卸除后，其变形以声速恢复的现象。金属弹性变形是金属在外力作用下其原子间距离发生可逆变化的结果。例如，具有立方晶格的金属，拉伸时外力破坏了原子间相互作用的吸力与斥力间的平衡，晶格沿受力方向被拉长，变为正方晶格，使材料发生伸长变形；当外力卸除后，原子间作用力又迫使原子回到原来的平衡位置，材料完全恢复到原状。弹性阶段的主要力学性能指标有弹性模量 E 、切变弹性模量 G 、横向变形系数 ν （又称泊松系数）、弹性比功 α_e 、比例极限 σ_p 和弹性极限 σ_e 等。

二、金属的弹性模量

金属弹性变形的抗力取决于原子间作用力的大小，用弹性模量 E 来表征。弹性模量 E 可看作是衡量材料产生弹性变形难易程度的指标，材料的弹性模量 E 愈大，使其发生一定量弹性变形所需的外力也愈大。在弹性变形阶段，应力与应变成正比，其比例系数就是弹性模量 E ，它们的关系式如下。

在拉伸或压缩状态下：

$$\sigma = E\varepsilon \quad (1-1)$$

式中： σ ——正应力（ N/mm^2 或 MPa ）；

ε ——应变（%）；

E ——弹性模量 (N/mm^2 或 MPa)。

在剪切状态下:

$$\tau = G r \quad (1-2)$$

式中: G ——切变弹性模量 (N/mm^2);

τ ——切应力 (N/mm^2);

r ——切应变 (rad)。

E 又称为杨氏模量正弹性模量, 它的物理意义是表示金属产生 100% 弹性变形时的应力大小。但这对金属来说并没有实际意义, 因为金属在开始发生塑性变形以前, 弹性变形一般不超过 0.5%。即使到断裂, 发生的弹性变形一般也只能达到 1%~2%。

弹性模量 E 、切变弹性模量 G 和横向变形系数 ν 三者之间有如下关系:

$$E = 2G(1 + \nu) \quad (1-3)$$

弹性模量在工程技术上叫做“材料的刚度”。弹性模量愈大, 材料的刚度愈大, 在一定应力下产生的弹性变形就愈小。机器零件一般都有刚度要求, 在工作条件下不允许产生过量的弹性变形, 否则就会降低它的加工精度。例如镗床镗杆的刚度不足, 镗削时如进刀量过深, 切削负荷较大, 镗杆自身会产生过量的弹性变形, 镗出的孔将出现偏小现象。因此, 在零件和结构设计中一定要考虑刚度问题。零件或结构的刚度, 除取决于材料的弹性模量外, 尚与零件或结构的尺寸和形状有关。由于金属的弹性模量主要取决于金属原子本性、晶格类型以及原子间距离, 是一个对成分、组织不敏感的性能, 因此, 通常用来改变金属力学性能的主要方法, 如热处理、合金化及形变强化等, 对改变零部件的刚度(弹性模量)的效果不大。

三、金属的弹性比功

弹性比功 α_e 是金属吸收弹性变形功的能力, 以开始塑性变形前单位体积所吸收的最大弹性变形功表示, 相当于应力—应变曲线上弹性直线段下所包围的面积。其大小为:

$$\alpha_e = \sigma_e \epsilon_e / 2 = \sigma_e^2 / 2E \quad (1-4)$$

式中: σ_e ——材料的弹性极限 (N/mm^2 或 MPa);

ϵ_e ——材料最大的弹性应变 (即弹性)。

从式 (1-3) 和式 (1-4) 可以看出, 提高材料的弹性极限 σ_e 或降低材料的弹性模量 E , 都可提高弹性元件的弹性比功 α_e 。为此弹簧钢的成分设计一般是适当提高硅、锰元素含量, 而将含碳量控制在 0.5%~0.7% 范围内, 并采用淬火加中温回火的热处理工艺或冷变形 (冷拔) 工艺, 以提高钢的弹性极限 σ_e 。软弹簧由于其对于弹性比功 α_e 和弹性 ϵ_e 的要求较高, 但受力一般不大, 所以常采用弹性极限高、弹性模量较小的磷青铜和铍青铜制造。

需要指出的是弹性与刚度之间的区别, 弹性表示材料弹性变形的能力, 刚度则表示材料弹性变形的抗力。例如汽车弹簧往往会出现以下情况; 一种情况是汽车没有满载, 弹簧变形已达到最大, 卸荷后, 弹簧完全恢复到原来的状态, 这是由于弹簧的刚度不足所引起, 应加大弹簧尺寸或改进弹簧结构。另一种情况是弹簧使用一段时间后, 发现弹簧的弓形愈来愈小, 即产生了塑性变形导致弹簧的弹性不足, 这是由于材料的弹性极限低所造

成。这可以通过改变钢种，调整热处理工艺等措施，来提高钢的弹性极限。

第二节 塑性变形

一、金属的塑性变形

塑性是材料发生塑性变形的能力，通常以试样断裂时的塑性变形的大小来表示（如拉伸时是以断后伸长率 A 和断面收缩率 Z 来表示）。塑性变形是指外力卸除后保留下来的残余变形。当应力超过弹性极限后，金属在继续发生弹性变形的同时，开始发生塑性变形。材料开始塑性变形的抗力以产生一定量残余变形的应力来表示，开始塑性变形的抗力指标可以用正应力来表示（如拉伸、弯曲试验时），也可以用切应力来表示（如扭转试验时）。

二、金属的理论屈服强度和实际屈服强度

金属的塑性变形主要是以滑移和孪生方式进行，两者都是由切应力引起的切变过程。例如单晶体受力后，所受力在其任何晶面上都可分解为正应力和切应力，但只有滑移面上的切应力在滑移方向的分力才引起滑移。对于多晶体金属来说，滑移首先是从那些滑移面对外力来说具有最适宜取向的晶粒开始，即从变形阻力最小的晶粒先开始，然后再逐渐过渡到多数晶粒，发生全面的塑性变形。开始滑移所需要的最小切应力，叫做临界切应力，它表征金属开始塑性变形的抗力。

理想晶体的临界切应力决定于原子间作用力，如图 1—1 (a) 所示，滑移过程中，当晶体的滑移面及滑移方向上，受到外加切应力 τ 时，将引起上下两层原子发生相对位移 x 。由于发生位移的原子会被它周围的原子所吸引，并朝离它最近的晶格平衡位置转移，因此两层原子间的作用力，必然要阻止位移的产生。

由图 1—1 (b) 可见，当位移 $x=1/4b$ 时，切应力达到最大值 τ_m ，而超过 $x=1/4b$ ，原子就可能位移一个原子间距到下一个平衡位置，并引起相应的塑性变形。可见 τ_m 就是理想晶体的临界切应力，经过计算：

$$\tau_m = G/30 \quad (1-5)$$

式中： G ——切变弹性模量 (N/mm^2)。

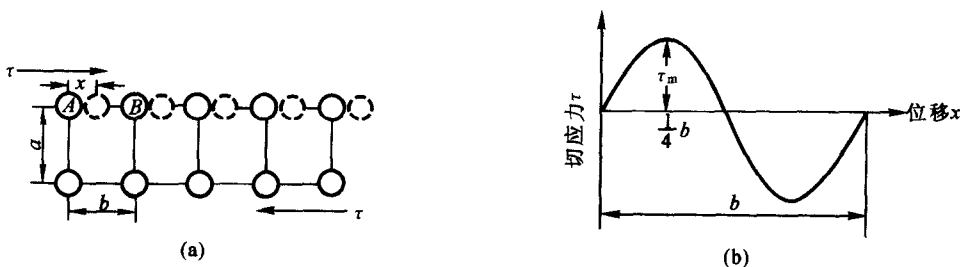


图 1—1 相邻原子面间位移与所需的切应力

由此可见，理想晶体的临界切应力（通常称其为理论屈服强度）和弹性模量一样，取

决于原子间结合力，故主要与原子本性和晶格类型及原子间距离有关。生产实践中常用金属的切变弹性模量 G ，一般在 $9.8 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$ 数量级，其理论屈服强度值应该在 $9.8 \times 10^2 \text{ N/mm}^2$ 数量级，但是，金属单晶体的屈服强度实验值（通常称其为实际屈服强度）约为 $0.098 \sim 0.98 \text{ N/mm}^2$ 数量级（例如铜的理论屈服强度值为 $823 \sim 1156 \text{ N/mm}^2$ ，而高纯度铜单晶体的屈服强度实验值为 $0.34 \sim 0.58 \text{ N/mm}^2$ ）。

三、塑性变形机理

屈服强度的实验值与理论值相比要小 $100 \sim 1000$ 倍甚至更大一些，原因是实际晶体中存在晶体缺陷——位错。实际晶体中的位错使塑性变形不是靠原子面间的整体滑移，而是依赖于位错运动来进行。当滑移面上存在位错时，在切应力持续作用下，位错逐步向前运动，当它运动到晶体表面时，位错消失，形成一个原子间距的滑移台阶。在位错运动过程中，晶体滑移依靠位错区的少数原子，相对移动一个很小的距离来进行。与整体滑移相比，塑性变形所需的临界切应力要小得多。由于实际金属晶体内部存在许多位错，它们是相互交织在一起的，形成三维网状分布。位错网中在滑移面上的位错线，在切应力作用下会产生滑动，但是它两端的结点受到不在滑移面上位错的牵制，而不能滑动，并起钉扎作用。这种位错在切应力作用下，可形成位错源增殖新位错。大量的新位错滑移到晶体表面，就会形成足够大的滑移台阶（尺寸可达 200 nm ，在电子显微镜下观察到的滑移线就是这种滑移台阶）。由于金属塑性变形是位错增殖和滑移的结果，因此，金属的实际屈服强度决定于位错在晶体中运动所受的阻力。概括起来，大致有下列几方面的阻力：位错的晶格阻力（派—纳力），即位错在完整晶体中移动所需的切应力；位错与其他位错的交互作用；位错与溶质原子、硬化相等的交互作用。

（一）晶格阻力

单个位错在完整晶体中移动所需的切应力，叫做位错运动的晶格阻力（派—纳力），以 τ_0 表示。晶格阻力是各类晶体普遍存在的，但晶体类型不同，晶格阻力对屈服强度的影响有很大的差异。软晶体的晶格阻力 τ_0 远小于理论屈服强度 τ_m ，其位错很容易滑动，这类晶体（如有色金属铜、铝等）的强度低，塑性好。硬晶体的晶格阻力 τ_0 接近于理论屈服强度 τ_m ，在室温下位错基本上不能动，它们的硬度高、脆性大，共价键晶体和一些氧化物晶体属于这一类。此外，体心立方的过渡金属，如铁、钨、钼、铌、钽等，在常温下特性与有色金属相似——晶体较软，但是在低温（ T 小于 $0.157 T_m$ ）下往往出现冷脆，晶格阻力升高，脆性增加。

（二）位错与其他位错的交互作用

位错运动要与晶体中其他位错发生交互作用，还必须克服这些位错所产生的阻力。这种阻力包括两方面：一方面是从其他位错附近通过所受的阻力；另一方面是与穿过滑移面的位错（这种位错称为位错林）相交所受的阻力。在位错密度较高的晶体中，位错间交互作用的这两种阻力，都与位错密度有关。是随着位错密度增加而增大，并与位错的分布情况有关，由此晶体的实际屈服强度为

$$\tau_i = \tau_p + K\rho^{1/2} \quad (1-6)$$

式中： τ_p ——相当于位错密度为零时，晶体的塑变应力，代表位错交互作用以外晶体对位错运动的阻力 (N/mm^2)；

ρ ——位错密度；

K ——与晶体本性、位错结构有关的常数。

面心立方金属中 τ_p 很小，可以忽略，而体心立方金属就不能忽略了，这说明体心立方金属具有较高的晶格阻力，与杂质有较强的交互作用。

(三) 位错与溶质原子、硬化相等的交互作用

1. 位错与溶质原子的交互作用

位错与溶质原子交互作用的结果是晶体的强度升高。原因是随着溶质原子溶入晶体，会使晶体点阵发生畸变，畸变造成的应力场与位错周围的弹性应力场交互作用，使溶质原子移向位错线附近。小于基体原子的置换原子倾向于移向位错线附近的受压位置；大于基体原子的置换原子或间隙原子倾向于移至位错线附近的受张位置，由此形成气团。一旦溶质原子在位错周围形成比较稳定的气团后，位错运动的阻力将增大。因为这时位错的运动一方面要克服气团的钉扎，另一方面又要克服溶质原子对位错运动的摩擦阻力。

2. 位错与硬化相的交互作用

第二相质点与可动位错交互作用的结果是，提高了材料塑性流变时的临界分切应力。交互作用的强化机制有两种：第一种是位错绕过第二相质点，并留下包围质点的位错环；第二种是位错切过第二相质点。

(1) 位错绕过第二相质点

位错在切应力作用下，向第二相质点移动时，受到第二相质点应力场作用而弯曲，随着切应力的增大，位错线的弯曲程度加剧并相遇于 A、B 等位置，由于 A 点的位错与 B 点的位错符号相反，所以，弯曲了的位错线相遇时，正负位错抵消，形成包围质点的位错环。以后每次位错绕过第二相质点时，总是会留下这种位错环。位错绕过质点所需的应力与第二相质点半径和所占体积百分数等因素有关。当第一相质点较小，则所需的应力较大，而粗大的第二相粒子则相反，见图 1—2。

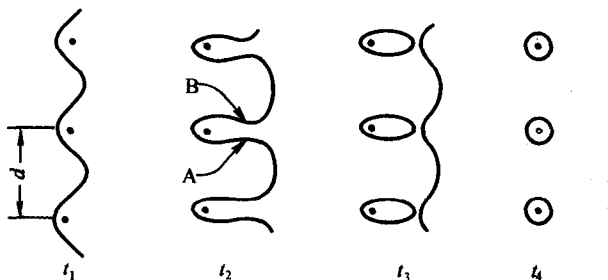


图 1—2 位错绕过第二相质点，并留下位错环的示意图

t —时间； d —质点间距

(2) 位错切过第二相质点

当位错和第二相质点之间的排斥力较小时，位错可直接切过第二相质点，使质点沿其滑移面相对移动一个柏氏矢量 \vec{b} ，见图 1—3。其结果是临界分切应力增大，强化原因主要是短程交互作用和长程交互作用，具体如下。

① 短程交互作用

位错切过第二相质点时，因形成新的界面而做功，使系统能量增高而强化基体。第二相质点与母相原子排列不同，其柏氏矢量也不同，也增加位错运动的阻力。临界分切应力的增量与粒子半径的平方根成正比。当第二相质点是有序相时，如位错切过质点，在滑移面上将产生一个反相畴界。反相畴界的界面能很大，可达 $100 \times 10^{-7} \sim 300 \times 10^{-7} \text{ J/cm}$ ，比第二相质点与母相界面能大，从而使临界切应力增高。短程交互作用的条件是位错与质点交互作用的距离小于 $10b$ (b 为柏氏矢量值)。

② 长程交互作用

当位错接近第二相质点时，第二相质点在母相中产生的应变场与位错应变场相互作用，阻止位错运动，然后，位错克服应变场的障碍，切过质点。长程强化对临界分切应力的作用取决于第二相质点产生的应变场。长程交互作用的条件是位错与质点交互作用的距离大于 $10b$ (b 为柏氏矢量值)。

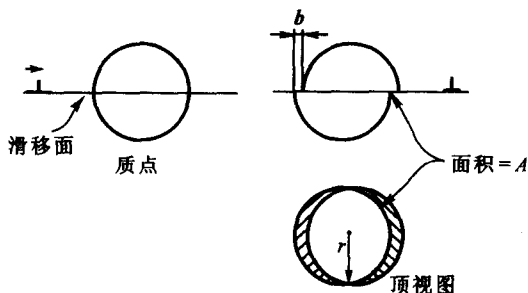


图 1—3 一个位错的滑移运动，切过一个第二相质点的示意图

四、提高屈服强度的方法

科研工作者通过实验了解到：如果把金属中的位错全部消除，也将其他内部缺陷和应力集中的因素清除，金属的屈服强度就会接近理论值 τ_m ，例如金属须（指直径为几个微米而高度完整的单晶体）的屈服强度就接近理论值。另外有些高硬度的晶体，只有在切应力接近于 τ_m 时才会发生滑移。而且它们的临界切应力与晶体中的位错数量无关，通过测量其硬度，再推算出的临界切应力与理论值很接近。由此可推断这类晶体硬度高、脆性大的原因，是其内部的位错难于滑动所造成。

根据上述分析，理论上提高屈服强度有两种方法：一种是完全消除金属内部存在的位错和其他缺陷，使金属的屈服强度接近理论值。另一种是在晶体中引入大量的晶体缺陷，以阻碍位错的运动。目前，在生产实践中虽然已经能够制造出无位错的金属须，但实际应