

杨桂通 熊祝华 编著

377

塑性动力学

清华大学出版社

DP

551

52.551
682

塑性动力学

杨桂通 熊祝华 编著



清华大学出版社

√101420

内 容 简 介

塑性动力学是固体力学的一个重要分支,它研究各种非弹性体或结构在短时间受强载荷作用时的变形和破坏规律,因而在工程实际中有着广泛的应用前景。

本书第一部分介绍了塑性动力学的基本理论。第二部分较详细地分析了结构的动力响应问题,第三部分则介绍并研究了塑性应力波的传播问题。

本书注重基本概念和基本理论的阐述,力求由浅入深,概念清晰,推理严谨,书中还介绍了本学科近年来的成就以及作者自己研究的成果。每章都附有大量参考资料的目录。

本书可供力学,机械,土建水利等专业的大学生或研究生作教材,也可供有关专业的教师和工程技术人员参考。

EP70/26

塑 性 动 力 学

杨桂通 熊祝华 编著

特邀责任编辑 徐秉业 孙学伟

☆

清华大学出版社出版

北京 清华园

清华大学印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

☆

开本: 787×1092 1/16 印张: 31 1/2 字数: 783 (千字)

1984年12月第一版 1984年12月第一次印刷

印数: 1~10000

书号: 15235·117 定价: 5.40 元

序

物体在冲击载荷下应力进入塑性阶段问题,很早就在生产实践和国防工程中占有重要的地位。其重要性随着技术的发展而日益增长。在抵抗爆炸载荷吸收冲击能量方面,既要防止冲击和爆炸载荷引起材料的破坏又要节省材料,这就需要进行细致的变形和应力分析。而另一方面,利用冲击和爆炸载荷最有效地使物体发生塑性变形也是工程中的重要应用,例如爆炸成形、穿甲等。这些方面的研究工作一直受到国际科技界的重视,文献是大量的,理论和实验方面的专著也很多。然而在国内还缺少这样一本全面系统地阐述这方面基本理论的书籍。本书介绍塑性动力学的基本理论和实际应用以及有关的新成就,值得欢迎。它将有助于从事这方面工作的同志系统地掌握塑性动力学的基本概念、基本理论和分析方法,对四化建设是一个有意义的贡献。

塑性动力学和准静态塑性力学问题的差别在于不再能忽略惯性项,变形也较前者为大,因而在数学处理上引起许多困难。同时由于应变率较大,不能忽略它对本构关系的影响,经常要考虑粘性效应,因而需要从物理上对变形机理做进一步探讨。

塑性动力学所处理的问题大致可分为两类。一类是应力波的传播,这时要考虑物体内部每个质点的惯性,质点的运动通过应力波的形式传播给它的邻近质点。在数学上表现为波动方程,运动沿方程的特征线以一定的波速传播开去,质点是在波到达之后才开始运动的。当应力超过弹性极限时,塑性变形将以塑性波的速度传播,这时波速的快慢随变形的大小和应变率的大小而异。另外由于应力波在边界上的反射和折射造成十分复杂的图象,在一些条件下,虽然初始的波动是弹性的,波干涉的结果会在某些地区产生塑性变形或破坏,在实际问题中也常有这种情况发生。另一类问题是结构物的动力响应。在这类问题中由于物体的尺寸较小,载荷作用的时间长于波通过物体的时间,波在物体内部经过多次反射已造成物体的整体运动,因而可以不再考虑应力波在体内的传播,而直接考虑整体性的惯性运动。这时人们研究结构物在动力载荷下的变形过程,求其最终的变形形状和大小。

至于从第一类问题如何过渡到第二类问题的细节,以及两类情况同时存在的交叉性问题,诸如厚板穿甲、结构的动力稳定性等问题就更为复杂,因而通常只从一个方面加以分析。

塑性动力学遇到的关键问题在于如何寻找出一个既便于计算又能正确代表材料动力性能的本构关系。从宏观实验来讲,目前均在一维情况下进行,在复杂应力状态下的实验要比准静态情况困难得多,因此通常是将准静态本构关系加上一个应变率的修正。这也有两种做法。一个简单的做法是将静态屈服条件乘上一个考虑整体平均应变率效应的因子,在结构物动力响应问题中较常用。更精细一点的做法是把应变率效应考虑在本构关系以内,在计算上就要繁复得多,然后将计算结果和宏观实验进行比较以确定一个较好的模型。本书第三章对此做了较全面的介绍。另一方面是从微观变形机理进行本构关系的探讨,它牵涉到位错的运动,不可逆热力学等内容,这也是目前研究的一个重要方面。本书在第一章中对位错动力学做了一些基本的介绍,这对于进一步理解塑性动力过程将是有帮助的。

在固体中应力波的传播过程所引起各质点的位移是较小的，通常还可以按小变形情况处理。而在结构物塑性动力响应问题中，则常要遇到大变形情况，其结果与小变形分析的差别较大，需要加以考虑，这也是目前这方面的研究重点。本书着重于在小变形方面打好理论基础，有了这个基础以后，读者就不难从文献中做进一步的探讨。我们也希望作者以后在这方面再做些介绍。

全书除系统地整理了散在文献中的工作，还补充了作者尚未发表的工作。作者以其丰富的教学经验，以细腻的推导，处理了每一个问题，使读者便于掌握。此书内容对于从事这方面工作的同志，将起到很好的引导作用。

北京大学 王 仁 1983 年 2 月

前 言

本书于十年前写成初稿，后几经修改，并作为固体力学专业研究生教材用过两遍，最后经过全面增删修订而成。本书的目的在于介绍塑性动力学的基本理论和实际应用，并限于小变形范围，只在适当的地方介绍了一些新近的成就。我们希望这本书能在塑性动力学的研究工作和工程应用方面为初学者打好基础。

本书注重基本概念和基本理论的阐述，力求由浅入深，便于学习。主要内容可分为三部分：第一部分是基础理论（第一章和第三章），第二部分是结构塑性动力响应（第二章、第四章至第七章），第三部分是弹塑性应力波的传播（第八章至第十一章）。后两部分在内容上是相互独立的，可以根据具体情况自由选读。本书读者只需具有理论力学、材料力学和弹塑性力学的基础知识，毋需有更多的力学和数学的准备。

本书插图按章编写，公式则按节编写。在后面章引用前面章的公式时，则在公式号前加一罗马字母，以示该式所在章次。例如“Ⅱ—8—24”则表示第二章第8节的24号公式。引用本章公式时，则略去章号。

北京大学王仁教授在本书的编著过程中，经常给以关怀和热心帮助，并仔细地审阅了书稿，提出了许多宝贵意见；作者也曾与重庆大学杨绪灿教授和清华大学徐秉业副教授进行过多次有益的讨论，得到了他们的帮助；张善元、杨绍瑞和孙学伟同志细心审核了书稿；特此一并致以衷心的感谢。

我的朋友和合作者湖南大学熊祝华教授仔细地审阅了我的全部书稿，推证了全部公式，书中的图表与论述都做了校核与修正。为阅读方便起见，他修改了原稿的一些叙述方式，增加了公式的推演步骤和文字说明。所以本书不少地方也反映了他的学术思想，大大地增加了本书的光彩。而这些工作都是他在一个很短的时间内完成的。由于作者水平有限，本书仍会有许多不妥之处，希予多加指正。

杨桂通

1982年8月24日

于太原工业大学

目 录

序

前言

第一章 绪论

§ 1-1 概述	1
§ 1-2 固体材料的动力特性	2
§ 1-3 在高应变率下塑性变形的微观机制	8
§ 1-4 塑性动力学的发展概况	10
参考文献	11

第二章 最简单的弹塑性系统的动力响应

§ 2-1 概述	15
§ 2-2 理想弹塑性系统	16
§ 2-3 理想刚塑性系统	30
§ 2-4 弹性线性强化系统	34
§ 2-5 弹性线性强化薄球壳在冲击内压作用下的动力响应	38
§ 2-6 弹粘塑性系统	42
参考文献	47

第三章 塑性动力学的本构方程和基本定理

§ 3-1 屈服函数与加载函数	48
§ 3-2 应变率无关理论	52
§ 3-3 过应力模型理论	56
§ 3-4 粘塑性模型理论 Perzyna 方程	58
§ 3-5 拟线性本构方程	65
§ 3-6 Bodner-Partom 理论	67
§ 3-7 动力学基本定理	69
§ 3-8 间断面的传播 动力和运动连续条件	79
参考文献	78

第四章 理想塑性梁的动力响应

§ 4-1 概述	81
§ 4-2 弹塑性梁动力分析的基本方程	82
§ 4-3 简支弹塑性梁在突加载荷作用下的动力响应	87
§ 4-4 简支弹塑性梁受冲击波作用时的动力响应	100

§ 4—5	刚塑性梁动力分析的基本方程	107
§ 4—6	无支承刚塑性梁的运动	112
§ 4—7	刚塑性简支梁的动力响应	124
§ 4—8	阻尼介质对刚塑性梁动力响应的影响	136
§ 4—9	地下结构顶盖的弹塑性动力响应	138
§ 4—10	无限长梁在中点受到恒速集中力作用时的运动	144
	参考文献	157

第五章 薄板的动力响应

§ 5—1	刚塑性薄板动力分析的基本假设和基本方程	159
§ 5—2	简支刚塑性圆板在矩形脉冲载荷作用下的动力响应	166
§ 5—3	简支刚塑性圆板在其它形式载荷作用下的动力响应	175
§ 5—4	应变率效应的影响	191
§ 5—5	简支圆板在阻尼介质中的动力响应	198
§ 5—6	简支刚塑性方板的动力响应	201
§ 5—7	无限大板的弹塑性动力分析	208
§ 5—8	无限大薄板在高速撞击下的变形	211
	参考文献	217

第六章 薄壳的动力响应

§ 6—1	壳体的屈服条件	219
§ 6—2	圆柱壳在冲击压力作用下的塑性动力响应	231
§ 6—3	柱壳在侧向及轴向冲击载荷作用下的动力响应	248
§ 6—4	球壳的塑性动力响应	254
§ 6—5	扁壳的塑性动力响应	261
§ 6—6	阻尼介质的影响	269
	参考文献	273

第七章 刚塑性体动力学的一般原理

§ 7—1	虚速度原理	276
§ 7—2	Hamilton 型的变分原理	278
§ 7—3	刚塑性体位移限界定理	283
§ 7—4	刚塑性体动力学的最小值原理	290
§ 7—5	最小值原理的应用示例	299
§ 7—6	刚塑性体的极值原理	307
§ 7—7	广义变分原理	317
§ 7—8	Gurtin 型的变分原理	327
§ 7—9	解的唯一性定理	329
	参考文献	331

第八章 一维弹塑性波

§ 8—1 概述	333
§ 8—2 两种坐标法	335
§ 8—3 特征线法	337
§ 8—4 弹性波	345
§ 8—5 弹塑性加载波	349
§ 8—6 弹粘塑性波	354
§ 8—7 激波	360
参考文献	372

第九章 卸载波和波的相互作用

§ 9—1 一般概念	371
§ 9—2 卸载波的确了解析法	372
§ 9—3 用迭代法确定卸载波	383
§ 9—4 用级数解法确定卸载波	385
§ 9—5 图解解析法	394
§ 9—6 波的反射和相互作用	402
参考文献	415

第十章 复合应力波

§ 10—1 非线性弹性长薄圆管中的压-扭复合应力波	416
§ 10—2 弹塑性长薄管中的复合应力波	420
§ 10—3 卸载波	431
§ 10—4 梁中的复合应力波的传播	439
参考文献	446

第十一章 平面波、球面波和柱面波

§ 11—1 弹性波	447
§ 11—2 弹塑性一维应变平面波	458
§ 11—3 弹粘塑性一维应变平面波	466
§ 11—4 弹塑性球面波	471
§ 11—5 弹粘塑性球面波和柱面波	484
§ 11—6 二维应力波	489
参考文献	495

第一章 绪 论

§ 1-1 概 述

塑性动力学是固体力学的一个分支学科,它主要是研究各种非弹性(主要是弹塑性)物体或结构在短时强载荷作用下的运动、变形以及破坏的规律。实际的工程材料大多数都是弹塑性的,它们的弹性工作阶段有限。当外载荷的强度足够大时,受力物体必然要有部分或全部进入塑性变形状态。因此,研究塑性动力学问题就日益为实际所必需。

当物体在局部受到突加载荷时,由于物质的惯性,突加载荷对于物体各部分质点的扰动不可能同时发生,而要经过一个传播过程,由局部扰动区逐步传播到未扰动区。这种现象通常称为应力波的传播。因为任何物体都具有一定的尺寸,所以,严格说来,物体受到突加载荷作用时,总会出现应力波的传播过程。当载荷作用的时间很短,或是载荷变化极快,以及受力物体的尺寸又足够大时,这种应力波的传播过程就显得特别重要,外力对于物体的动力效应必须通过应力波的传播来加以研究。例如,在无限介质中局部扰动引起的动力效应,半无限介质表面以及半无限长杆端部的扰动所引起的动力效应等都属于这类问题。

对于象梁、拱、薄板、薄壳这样一类结构,它们在三个尺寸中,总有一个或两个尺寸远较其它尺寸为小,而突加载荷作用的方向又往往就是尺寸最小的方向。在这种情况下,应力波在这一方向上传播所需要的时间比起载荷作用的时间要短得多(通常,纵波与剪切波在金属中的传播速度约为每秒几千米)。因此,应力波的传播现象很快就消失,结构的动力效应主要表现为结构的(弯曲)变形随时间的变化。这类问题通常称为结构的弹塑性动力反应或动力响应问题。在动载荷作用下,当载荷强度比较大、作用时间又足够长时,结构的塑性变形将随时间而不断发展,其塑性区将不断扩大(包括出现新的塑性区以及若干塑性区因扩大而合并等),终致引起结构的断裂、贯穿或破坏。如果载荷的强度虽比较大,但作用的时间很短,因此施加于结构的能量仍然是有限的。在这种情况下,物体的运动和变形将在输入的能量消耗(主要由于塑性变形)完以后,停止于一个确定的状态。这个最后的状态往往是工程中最感兴趣的。

应力波的传播和动力响应是塑性动力学的两类主要问题;前者研究局部扰动向未扰动区的传播,它是将动力效应作为一个传播过程来研究的;后者则忽略扰动的传播过程,研究结构的变形与时间的关系。这两类问题都是工程技术中广泛注意的问题。诸如在穿甲弹及装甲板的研究中,在舰艇与飞行器的设计中,在原子爆炸所产生的强冲击波的防护工程设计中,以及在机械工业、土建水利工程、抗震结构设计等广泛的领域中,都会遇到弹塑性应力波的传播或动力响应问题。而工程技术中众多实际问题的不断提出,又促使塑性动力学作为一个独立的分支学科得到迅速发展。

塑性动力学区别于通常称为《塑性力学》(静力学)的主要特点,在于弹塑性材料在动载作用下具有一系列重要的、与静载作用下不同的力学特性(这些特性将反映在本构关系中);同时,在分析动力问题时,必须计入介质的惯性。这样,塑性动力学问题就比塑性静力学问题

及弹性动力学问题都要复杂得多。在求解塑性动力学问题中, 往往要遇到不少数学上的困难, 而不得不采用各种近似法、渐近法或数值方法等。同时, 为了简化计算, 目前有不少的研究工作, 都忽略材料的动态性质, 在动力分析中仍采用静态塑性本构关系。显然, 这种做法只在某些材料的低应变率情况下才有近似性。

§ 1-2 固体材料的动力特性

塑性动力学的基本问题之一是要建立材料的动态本构关系, 它将反映材料的动力性质。动态本构关系的建立, 既有赖于理论分析, 又有赖于实验研究。材料的动力实验结果是建立材料动态本构关系的重要依据。实际上, 塑性动力学问题的研究就是从固体材料动力特性的实验研究开始的。

1-2-1 材料动力特性的某些实验结果

最早进行材料动力实验的是 Ludwik (1909)^[1-1]。他用长 3m, 直径 3mm 的锡线在 Amsler 试验机上做动力拉伸实验。拉力 P 为 19.6~147N(2~15kg)。得出了在不同加载速度下的 P - ϵ 曲线, 如图 1-1 所示。图中 ϵ 为应变。 V_0 对应于静态加载。实验结果表明, 加载速度提高时, 应力应变曲线也相应提高。

尔后, Seibel E. 和 Pomp A. (1927), Deutler (1932)^[1-2] 又做了多种金属材料的动力实验, 结果表明, 应变率增高时, 屈服极限和瞬时应力亦相应提高。Deutler 的实验结果示于图 1-2。

1914 年, Hopkinson^[1-3] 设计了压杆实验技术, 后来, 经过 Davies、Kolsky 多次修改, 并定名为分离式压杆实验技术 (SHPB), 用以进行波的传播的实验研究。图 1-3 为 Kolsky^[1-4] 用自己设计的 SHPB 技术对铜试件 (厚 0.05cm) 所做的实验结果。图中实验点的间隔为 2 微秒。

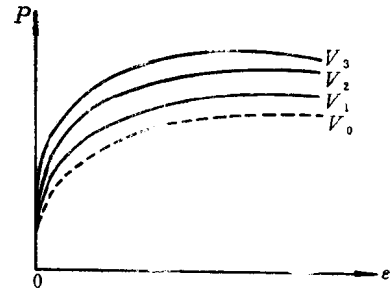


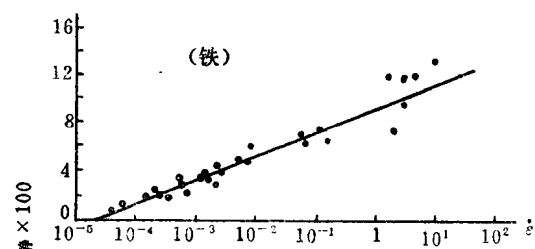
图 1-1

从本世纪三十年代以来, 动态实验结果更多了。图 1-4 是 Надеева 的实验结果^[1-5], 图 1-5 是 Taylor 的实验结果^[1-6]。而图 1-6 是 Clark-Dwez^[1-7]及 Manjonie^[1-8]的实验结果。

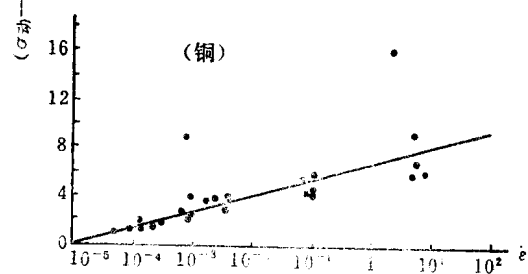
1-2-2 固体材料的动力特性

从许多动力实验的结果中, 可以观察到固体材料的下列主要动力特性。

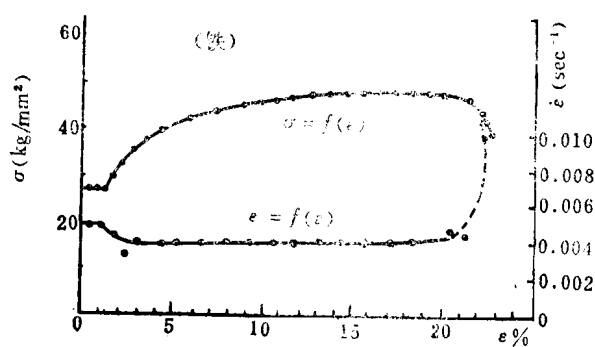
1. 屈服极限有明显的提高 以上实验结果表明, 许多金属材料在快速加载条件下, 屈服极限有明显提高, 而屈服的出现却有滞后现象。图 1-7 为软钢的静力和动力拉伸实验结果。图 1-6 中实线为软钢在不同应变率下的动力实验结果, 它表明屈服极限 σ_0 随应变率的增加而明显提高。当应变率 $\dot{\epsilon} = 200\text{sec}^{-1}$ 时, 屈服极限大约由静态情况下的 $2.71 \times 10^8\text{Pa}$ (2763kg/cm^2) 提高到 $5.76 \times 10^8\text{Pa}$ (5874kg/cm^2)。实验结果还表明, 软钢在动载作用下屈



(a)



(b)



(c)

图 1-2

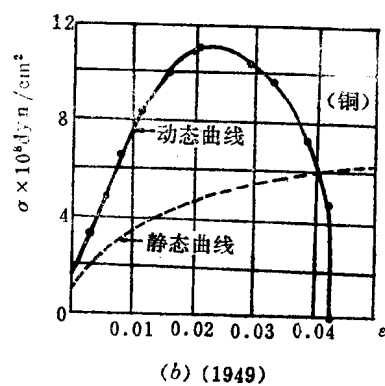
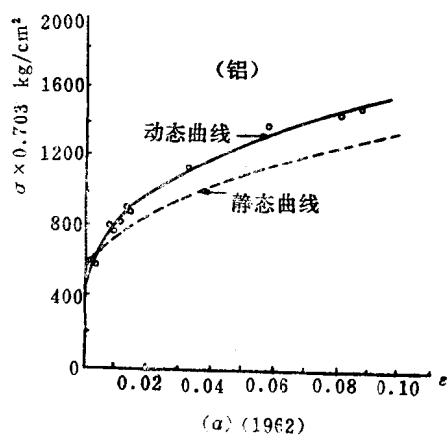


图 1-3

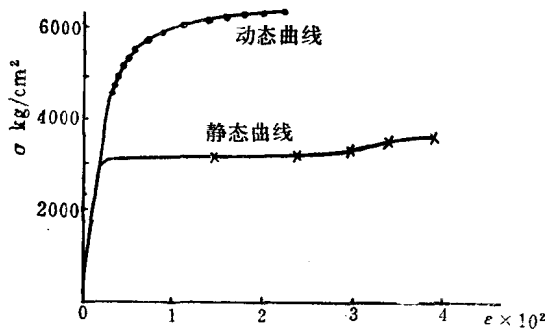


图 1—4

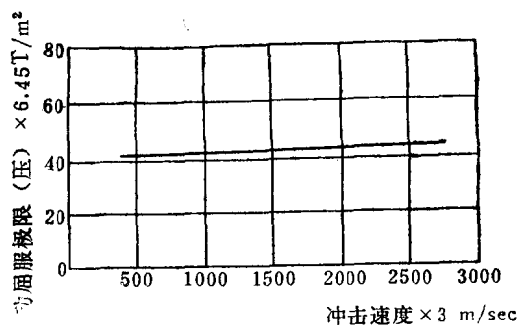


图 1—5

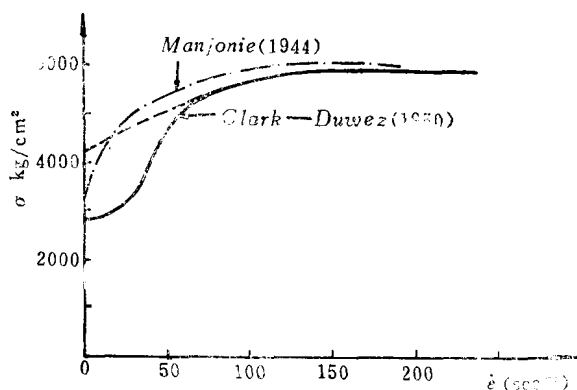


图 1—6

屈服极限提高的效应最为明显，一般可提高 2~3 倍，直到与强度极限变化曲线相连接时为止（图 1—6 中的虚线）。随着屈服极限的提高，滞后时间则逐渐缩短，且与初始冲击应力有关。当初始应力为 $560 \times 10^3 \sim 35 \times 10^3 \text{ kPa}$ ($5710 \sim 357 \text{ kg/cm}^2$) 时，滞后时间约在 $40 \mu\text{sec} \sim 1.5 \text{ msec}$ 之间；滞后时间还与材料性质和温度等条件有关。图 1—7 是 Johnson 等人^[1-9]对低碳钢的实验结果。

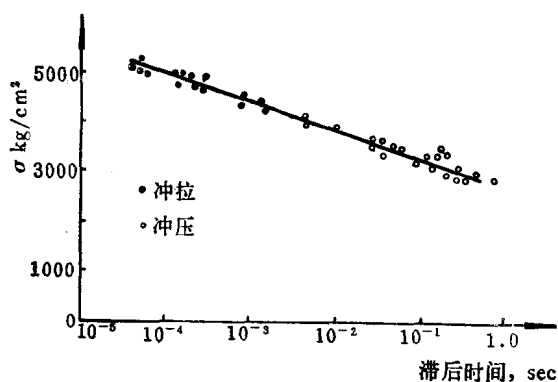


图 1—7

2. 瞬时应力随应变率的提高而提高 在同一应变值下，动态应力要比静态应力为高，

两者的差常称为“过应力”。当应变率 $\dot{\epsilon} = 10^{-5} \sim 10^3 \text{sec}^{-1}$, $\epsilon \approx 10^{-2}$ 时, 许多金属材料都呈现出这种特性。屈服极限和瞬时应力随应变率提高而提高的现象, 统称为应变率效应。应变率效应显著的材料称为应变率敏感材料。固体材料对应变率的敏感性不只与材料的种类有关, 而且与温度及材料的内部结构状态 (例如岩土的组成状况) 有密切关系。

实验结果表明, 各种工程材料都存在一个应变率敏感性界限。金属材料的应变率敏感性界限大约在 $10^{-3} \sim 10^3 \text{sec}^{-1}$ 之间。当应变率低于 10^{-3}sec^{-1} 时, 属于准静态情况, 应变率效应可略去不计。应变率高于 10^3sec^{-1} 时, 应变率效应不太明显, 材料的动力特性将可能增加新的内容。

在塑性动力学中, 引用下列应变率敏感系数 λ , 作为表征材料应变率敏感性的参数

$$\lambda = \frac{\partial \sigma}{\partial (\ln \dot{\epsilon}^p)} \quad (2-1)$$

式中 $\dot{\epsilon}^p$ 为塑性应变率。对大多数金属材料来说, 在一个很宽的应变率变化范围内, λ 近似为一常数 (见图 1—8)。图 1—9 a, b 是 L.Klepaczko(1968) 和 U.S.Lindholm(1964) 用铅、铝做的实验^① (用铜或其他材料的情况相类似)。实际上由图可以看出, 瞬时流动应力和应变与应变率之间的关系, 在一个很宽的范围内可写成下列形式:

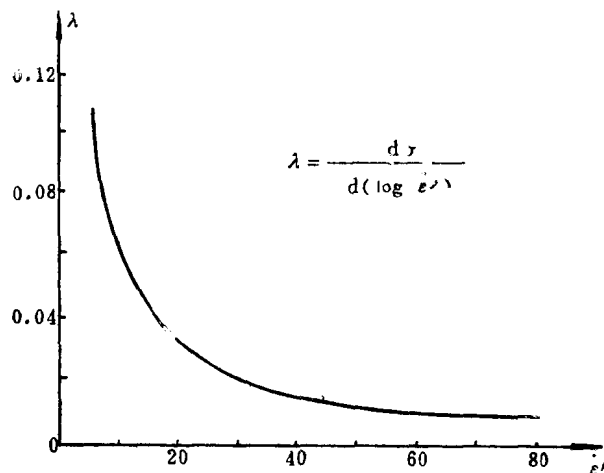


图 1—8

$$\sigma = \sigma_0(\epsilon) + \sigma_1(\epsilon) \log(\dot{\epsilon}^p)$$

其中 $\sigma_0(\epsilon)$, $\sigma_1(\epsilon)$ 在 $\epsilon = \text{const}$ 时都是一个确定的值。若写成无量纲形式, 则有

$$\frac{\sigma - \sigma_0}{\sigma_0} = \frac{\sigma_1}{\sigma_0} \log(\dot{\epsilon}^p)$$

由此可得 (2—1) 式。若应变率较高 ($\dot{\epsilon} > 10^3 \text{sec}^{-1}$), 则瞬时流动应力不再随应变率的对数而变化, 而有下列线性关系

^①见 J.Klepaczko, J.Mech. Phys.Solids, 16, 255—265, 1968.

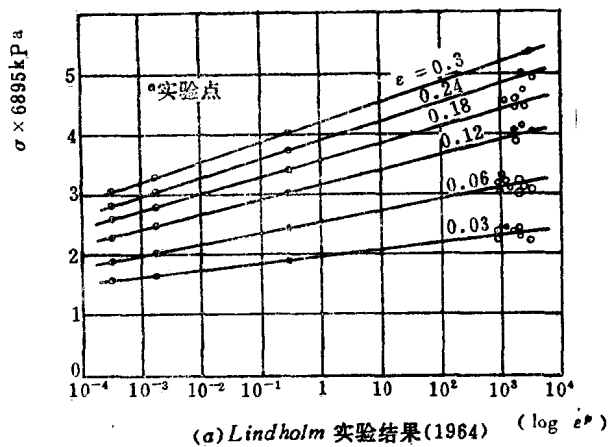


图 1-9

$$\lambda' = \frac{\partial \sigma}{\partial \dot{\epsilon}^p} = \eta = \text{const} \quad (2-2)$$

η 称为粘性系数 (单位为 kNsec/m^2)。

应变率效应是固体材料动力特性的主要方面, 在动态本构关系中要注意反映材料的这一动力特性。

3. 瞬时应力随温度升高而降低

从一般材料的动力实验中发现, 低温和快速加载都将使材料的强度提高, 即在给定应变率下, 瞬时应力将随温度升高而降低。图 1-10 给出了钼在一定应变 $\epsilon = 0.08$ 下的流动应力在不同温度时与应变率 $\dot{\epsilon}$ 的关系曲线和铝合金材料的应变率敏感系数 λ 随温度的变化情况。

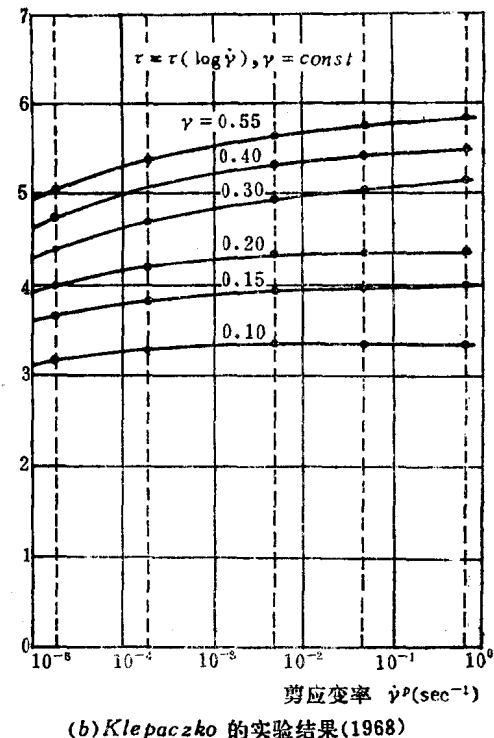
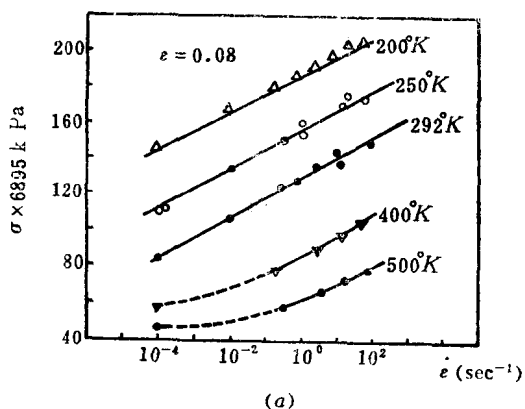


图 1-9

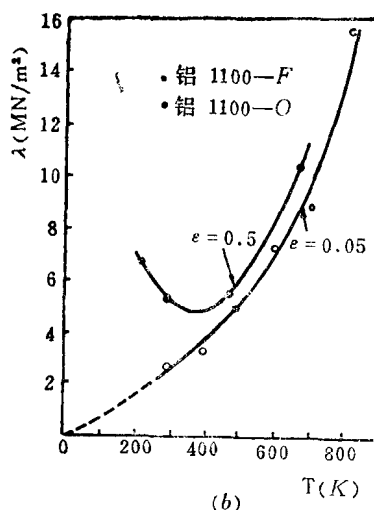


图 1-10

4. 应变率历史效应 在给定的应变率下, 材料的应力应变曲线对于同种材料是一定的。

设在加载过程中, 应变率改变, 此时, 材料的应力应变关系并不立刻遵守与改变后的应变率相对应的应力应变关系 (图 1—11) ①。

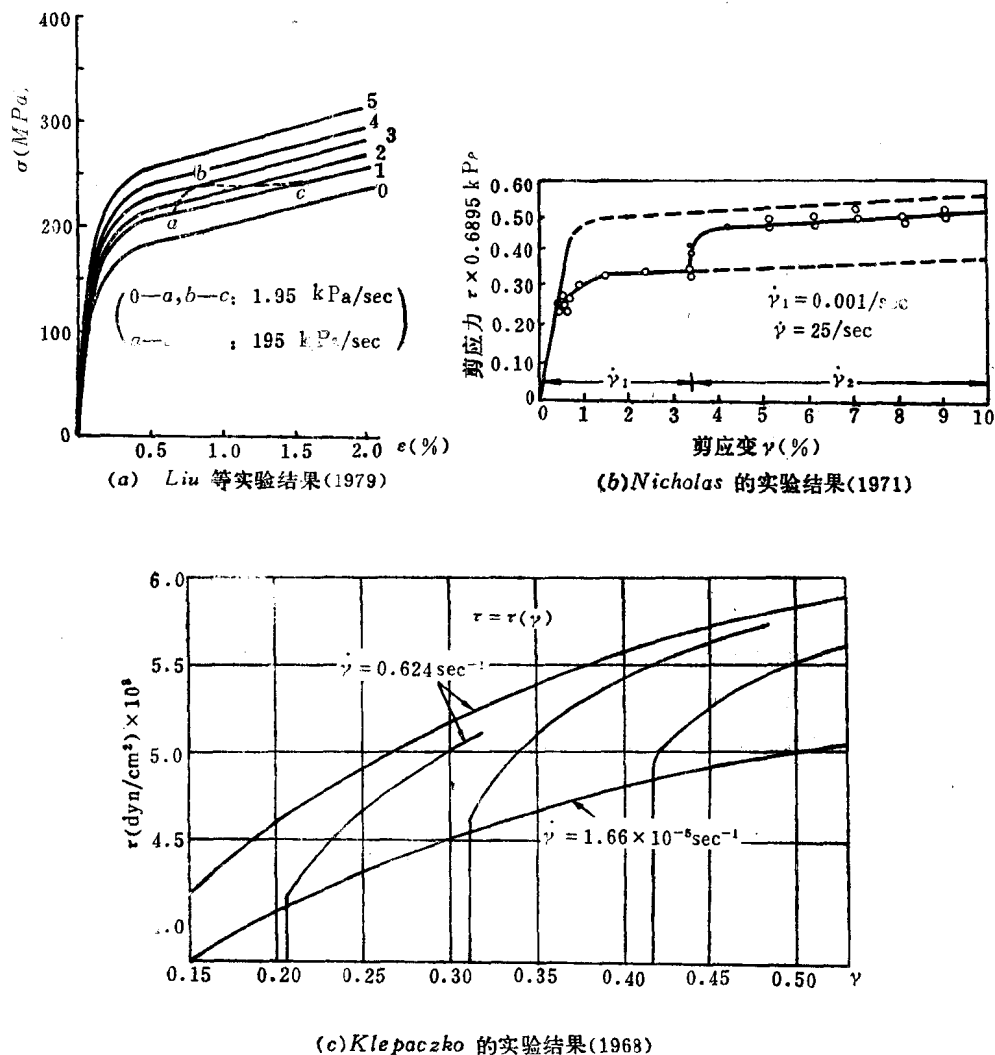


图 1—11

图 1—11a 中的曲线 0—0, 0—1, 0—2, 0—3, 0—4, 0—5 分别对应的应变率为 0, 1.95 kPa/sec, 19.5kPa/sec, 195MPa/sec, 1.95MPa/sec, 19.5MPa/sec, 所用材料为不锈钢。图中虚线为应变率改变的情况 (已注在图中)。图 1—11b—c 为铝合金材料的实验结果。以上各图均表明固体材料对应变率历史往往是有“记忆”的, 称为应变率历史效应。

此外, 固体材料在动态条件下还有其它一些力学特性。例如, 随着应变率的提高, 材料的强化效应将有所降低, 而破坏强度则有所提高。例如, 玄武岩的抗压强度在应变率为

① 见 M.C.M. Liu and E. Krempl, JMPS, 27, 516, 1979; T. Nicholas, Exp Mech, 11, 8, 1971, 370; J. Klepaczko, JMPS, 16, 255—266, 1968.

10^{-4}sec^{-1} 时约为 $345 \times 10^3 \text{kPa}$ (3518kg/cm^2), 而当应变率为 10^3sec^{-1} 时, 则可提高到 $690 \times 10^3 \text{kPa}$ (7036kg/cm^2)。又如, 介质在很强的激波作用下可能发生相变, 以及在超高速加载条件下介质将出现许多新的物理现象, 等等。

§ 1-3 在高应变率下塑性变形的微观机制

在高应变率条件下, 固体材料塑性流动的研究通常取两种途径: 在宏观水平上的研究和微观水平上的研究。在宏观水平上的研究工作已经进行了一百余年, 取得了丰富的实验数据, 捕捉了大量有意义的物理现象。并由此建立了有效的塑性动态本构关系 (见第三章)。然而, 我们知道, 宏观现象的物理基础, 特别是塑性流动的微观机制, 以及它与本构关系之间的联系, 则是塑性动力学基础理论研究的一个核心问题。

从原子水平看固体材料的弹塑性变形, 可以把所研究的固体看成是由位错运动引起塑性流动的晶体。因而对于许多金属和合金材料来说, 就可以借助于位错动力学理论进行塑性流动微观机制的系统的分析。

不少研究结果^①指出, 材料在未受外力扰动前, 原子排列是有规则的。不同的金属材料各自严格地按一定几何规则排列。其原子排列最密的方向是易发生滑动的方向。晶格中原子排列最密的平面叫做解理面或滑移面。每一个滑移面和在该面上的一个滑移方向构成晶格的一个滑移系。根据金属的晶格种类不同, 滑移系的个数也不同。当晶体受力作用时, 在某一滑移系的剪应力达到该滑移系的极限剪应力时, 该滑移系即开始滑动, 开始产生塑性流动。这就是说, 金属材料塑性变形的微观机制主要是沿解理面的滑移。人们发现, 实测极限剪应力的数值比上述理论值 (即沿滑移面有一个原子间距量级的滑动时, 剪应力应为剪切模量的量级) 小几个数量级。这种偏差是由于把金属晶格的构造太理想化的结果。实际上, 晶格一般地都有缺陷。这种有序状态的晶体缺陷即所谓位错。位错实际上是在原子格子中的不连续线。单位体积中这种不连续线的总长度称为位错密度 ρ 。在退火材料中通常 $\rho = 10^7 \text{cm/cm}^3$ 。

位错主要分为两种类型: 一种为刃型位错 (图 1-12); 一种是螺型位错 (图 1-13)。前者滑移方向 DC 垂直于位错线 MN ; 后者则滑移方向 PP' 平行于位线 MN 。

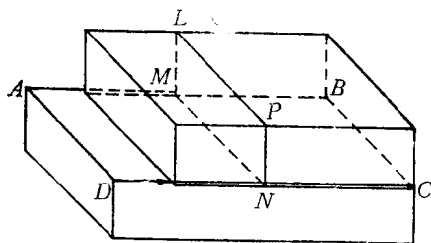


图 1-12

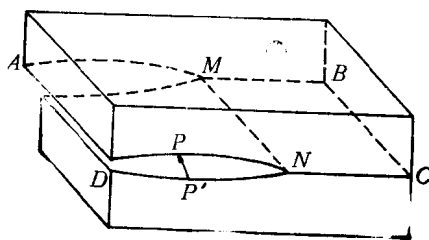


图 1-13

此外还有包含以上两种位错成分的混合位错。

在位错动力学中, 表征滑移运动的大小和方向的量为 Burgers 矢量。Burgers 矢量的方

① 见 Cottrell A.H. Dislocation and plastic flow in Crystals, Oxford, 1956. (中译本: A.H. 科垂耳著, 葛庭燧译, 《晶体中的位错和范性流变》, 科学出版社, 1960.)