

# 材料动态力学性质研究简况

中国科学院 白以龙 赵士达 林玉环  
力学研究所 寇绍全 杨根宏

## 一、一般情况

材料动态力学性质是工程实践提出来的课题,历史很长了,但至今仍是不少重大工程问题的拦路虎。

在高能粒子束破坏材料的研究中,如激光打靶,必须根据应力波导致材料破坏,反过来对激光源的性能研制提出要求,这就必须首先摸清材料动态破坏的规律,做为全部工作的先行和基础。

在研制承受冲击载荷的材料时,什么材料能最有效地承受动载而不破坏,或变形阻力大,哪些材料性能标准能有效地标志它抗各类动载的性能,这类问题目前不清楚。由此造成材料研制处于模仿、画加打的状态,甚至一些产品不经或很少经材料力学检验,而直接靠靶试,造成很大浪费,收效又不明显。其源就在于对材料动态力学性质的规律缺乏认识。

下面简介目前观察到的几个一般现象:

(1) **屈服点提高** 金属材料在冲击载荷下屈服点提高,屈服现象则滞后发生。例如:在冲击拉伸作用下,钢丝承受的应力超过“静”屈服应力50%,并延续了将近100微秒,而明显屈服(图1),随着屈服点提高,滞后时间缩短。在高应变率的Hopkinson杆的实验里,滞后时间约为10微秒左右。

### (2) 流动应力随应变率和温度的变化

对许多金属和合金材料,如铝、铜、铁、铅,以及合金钢,钛合金等,做了大量的试验,实验中 $\dot{\epsilon} = 10^{-5} \sim 10^3$ /秒,  $\epsilon \sim 10^{-2}$ 。总的趋势是流动应力随温度的下降和应变率的提高而提高。而随应变率的变化是与应变率的量级改变成比例的。如

$\lambda = (\partial \sigma / \partial \log \dot{\epsilon}^p) \dot{\epsilon}^p, \approx (10 \sim 100)$  公斤/厘米<sup>2</sup>  
对于不同结晶结构,  $\lambda$  的数值不同。如对B·C·C合金,特别是钢,  $\lambda$  更大。但也有负 $\lambda$ 的情况。如对于纯铁,高温下的软钢,就存在此情况(图2)。

在高应变率( $\dot{\epsilon} > 10^3$ /秒)时,应变率敏感系数 $\lambda$ 迅速增加。在许多情况下,流动应力随 $\dot{\epsilon}$ 成线性变化,就仿佛是粘性流那样 $\eta = \partial \tau / \partial \dot{\gamma}$ ,如软钢约为 $\eta = (2.1 \sim 2.8)$  千牛顿·秒/米<sup>2</sup>。

根据位错的Orowan公式:  $\dot{\epsilon} = \phi b \rho \bar{V}$   
Burger 矢量 $b \sim 3 \times 10^{-10}$ 米,可动位错密度 $\rho \sim 10^{10}$ /米<sup>2</sup>,平均位错速度 $\bar{V}$ 的极限速度是弹性剪切波速 $C \sim 3 \times 10^3$ 米/秒,  $\phi \sim 1$ ,于是极限塑性应变率 $\dot{\epsilon} \sim 10^6$ /秒。在更高的应变率下,宏观塑性效应退居次要,而成为流体态。

### (3) 岩石破碎强度随应变率的变化

一些实验发现岩石破碎强度也随应变率的提高而提高,其关系也大致为 $\sigma \propto \log \dot{\epsilon}$ ,如对一种玄武岩,抗压强度由50千磅/吋<sup>2</sup> ( $\dot{\epsilon} = 10^{-4}$ /秒)提高到100千磅/吋<sup>2</sup> ( $\dot{\epsilon} = 10^3$ /秒)。

### (4) 塑料

塑料和聚合材料,表现了明显得多的应变率效应(如图4)。

### (5) Hugoniot曲线

在较高的压力下,材料呈流体状态,用冲击方法测量了该状态下的击波绝热曲线——Hugoniot曲线。作为构作状态方程的基础,并发现了击波速度和质点速度间的线性律,这方面的资料已汇集成册供参照使用。

### (6) 崩落、角裂、层裂

这发生在高速碰撞等许多实际现象中,是由应力波在材料自由表面反射造成的一种动态破坏,其破坏

位置常在自由面附近的边、角等处。

### (7) 绝热剪切不稳定性

在穿甲弹冲塞穿甲等现象中发现冲塞表面一薄层有明显加热的痕迹，硬度增高，晶粒变细，沿剪切方向晶粒拉长等。

材料动态力学性质可大致归为两类：一类是连续变形性质，即所谓的本构关系，也就是应力、应变、应变率等的关系。另一类是破坏性质。本构关系的研究是建立固体力学以来的一个基本问题。在均匀、各向同性弹性小变形时，问题很简单，只要确定两个弹性常数就行了。但是从此稍稍往前推一步，例如小变形塑性，问题的复杂性就大大增加了。如果在本构关系中再考虑速率效应，其难度就更可观了。塑性动力学发展的二十年充分体验了这个困难。其次材料本构关系的研究，一直是通过典型试样在材料试验机上的材料力学试验来进行的。在动载荷情况特别是应变率较高的情况（如  $\dot{\epsilon} > 10^2$ ），试验设备和样品的惯性，会明显影响实验结果。为了获得真实的本构关系，必须从实验结果中排除上述影响，这要求实验概念和设备的革新，要求记录设备有足够的分辨力。这些就是动态时本构关系研究中的两个主要难点。

材料破坏性质的研究，一开始就以独特的面貌出现。十九世纪末和二十世纪初，Hopkinson 父子做了落锤加载于金属丝末端，拉伸金属丝的实验。发现随着下落高度的增加，首先在金属丝的上端拉断，而且在相当大的一个重量范围内，金属丝的拉断与重量无关，只取决于落锤的高度。提高落锤高度至开始发生拉断现象的高度的四倍时拉断点由细丝顶部移至细丝下端。这是传统的静态拉断予料不到的。此后陆续发现的动态破坏，如崩落、角裂、裂纹分叉、绝热剪切不稳定性等都具有这种静态无法予料的特征。这种特点给研究既带来了困难，也带来了方便。困难之处在于静态破坏概念，研究方法，几乎无法借鉴。方便之处在于现象明显，便于捕捉（不象本构关系里有些问题比较隐蔽）。正因为如此，动态破坏的研究提出了一些新方法，新概念。

鉴于材料动态力学性质研究的上述特点和困难，所以二十年来的进展比较缓慢，如实验重复性差（图4），缺乏完善的理论等。当然在实验设备，测量技术，实验理论，分析方法和实验结果上获得了一些进展，但都是日积月累，逐步取得的。因此，对近期面貌的评述，就不得不从历史性的回顾开始。

## 二、实验设备和方法

从上一世纪到二次大战，实验家们一直在如下基

本假定下，从事动态材料力学性质的实验研究。即：对于短试件而言，冲击试验和准静态材料力学试验是等效的。这便很自然地可以把静态试验的手段移植过来。但是，从十九世纪末，就发现一个实验与另一个实验无法重复，这种困惑的局面一直持续到第二次世界大战，那时有了一个重要的进展。

1945年前后，von Kármán, G. I. Taylor 和 Рахматулин 分别独立地研究了塑性波的理论，并且在材料性质与应变率无关的假设下（应变率无关理论），分析了材料的性质和波动行为的关系。其结果使人们认识到高速变形下，材料的力学性能不能简单用静载方法测量，实验机和样品的惯性等等都会影响实验结果，造成材料力学性能上的假象。

Kolsky 在准静态、短试件冲击实验的传统基础上，吸收了上述思想，改进了 Hopkinson 压杆，提出了所谓 Split-Hopkinson Pressure Bar 即 SHPB 的实验方法，经过六十年代不少人的改进，其基本结构如图5。其中两个长杆既是加力装置又是测量装置。样品很薄，相对于较长的波长，发生了应力平均化，处于准静态。这个巧妙的实验方法，很快就被普遍采用了。

目前，对各类材料试验的不同动态特点，可做如下分类：

$\dot{\epsilon}$	$10^{-8} \sim 10^{-6}$	$10^{-4} \sim 10^{-2}$	1	$10^2$	$10^4$
分类	蠕变	准静态	中 $\dot{\epsilon}$	杆碰撞	高速平板碰撞
设备	恒载试验机	液压试验机	气动或机械试验机	气动或火药枪	轻气炮或炸药透镜
动态特性	记录 $\epsilon(t)$	恒 $\dot{\epsilon}$ 试验	振动问题	弹塑性波	弹塑性波和冲击波
	不考虑惯性力			惯性力重要	
	等温过程				绝热过程
	一维应力				一维应变

已发现，在较低应变率下，准静态假设是可用的。因此，本文着重介绍高应变率下的材料力学性质。

用 Kolsky 提出的 SHPB 实验，在  $\dot{\epsilon} \sim (10 \sim 10^3)$  范围内，取得了一批实验数据（如前节所述）。在测量技术上，采用了电子学技术，如电容器法测位移，应变片法测应变，压电晶体测应力等。最重要的是 Bell 建立的衍射光栅法直接测量试件的应变。由于实验方法和测量方法的改进，发现了一系列新的问题。在六十年代后期，Bell 总结了许多研究者的结果，并与衍射光栅法的直接测量做了比较，指出：即使对于简单的退火铜，各实验者得到的结果也相当分散（图4）。

因此,对SHPB方法必须进一步推敲。这些问题有:应力平均化的过程,径向惯性的影响,端部摩擦的影响等等。七十年代有人用计算机模拟,仔细研究了这些问题。1975年Beltholf做的二维轴对称的模拟计算是较详细的。他的计算明确显示了径向惯性在各个部位的影响及对实验结果的影响。对于样品,则表明当 $l/d = v_s \sqrt{3}$ 时(与过去的简化分析一样),试样的惯性可降低到最小。

为了克服上述困难,发展了扭转Hopkinson杆的实验。这类实验原则上可以消除高阶色散,并把径向惯性和应变不均匀性降至最小。

一维应力实验的主要限制是应变率不很高( $\dot{\epsilon} \sim \Delta v/l \leq 10^4$ ),应力水平也不高(与强度成正比),为此,又发展了一维应变实验。由于一维应变实验是侧向被限制了变形的实验。因此可以做到较高的应力,以与冲击波的Hugoniot实验曲线相衔接。一维应变实验的主要手段是压气炮和炸药透镜,特别是轻气炮。

用于动态材料力学性质研究用的轻气炮,也是几种潮流在六十年代汇集的结果。

由于爆炸作用,高速碰撞等问题的直接需要,感到一维应力实验应力不够高,应变率亦不够高,于是提出了研制新的实验手段,以满足研究高于屈服应力水平的材料动态力学性质的实际要求。

另一方面,由于空间计划的发展,已在空间技术部门发展了一种能准确控制高速飞行实验装置——轻气炮。由于使用的是较轻的气体——H或He,惯性较小,故可达到较高的发射速度,这类压气装置实验重复性好,易于控制;速度连续可调,这些特点都是发展新的材料实验技术必不可少的条件。

第三方面,是亚微秒的电子学和光学记录仪器发展起来了,这使材料的高速效应(特别是在应力波结构上的反应)得以进行观察和记录。

目前压气炮的实验能力大约为:

	口径(吋)	弹速范围(公里/秒)	
		最小	最大
单级 压气炮	2.5	~0.1	1.5
	4.0	~0.1	~1.5
	6.0	~0.1	~0.6
二级 压气炮	0.2	/	~11.0
	1.2	2.0	8.2
	2.0	1.4	6.5
	2.7	1.0	4.0

据泽冈昭统计,西方各国共有 $\phi 100$ 以上的一级轻气炮十门,日本也仅有 $\phi 20 \sim 60$ 的炮,至于二级炮世界上约有五十门,其中长度超过30米的15门,最大的是 $\phi 76, l = 70$ 米,设在美国Sandia实验室;再有是 $\phi 40, l = 35$ 米,设在法国原子能研究所。美国的研究设施主要隶属于原子能委员会(能源署)和军方。西欧则主要属于法德Saint-Louis联合研究中心。

近几年来,用压气炮对弹性前驱波的衰减,动态相变,各种材料的加卸载曲线,动态破坏,及其他物理效应做了不少工作。

另一类是:复合应力的实验。在静态实验里知道,简单拉伸或纯剪实验对材料在复杂应力下的行为是不充分的,因此发展了薄壁筒的压、扭实验。这个原则对动态也适用,因此,在一维应力实验基础上,发展了加围压的SHPB,压扭组合实验等。在一维应变实验里也开始发展了复合应力实验。如Clifton的斜撞击试验,它是在炮筒里加一沟槽以定向,使倾斜板撞在倾斜靶上,达到压、剪复合加载的目的。

还有一类试验装置是膨胀环,它的优点是免去各种应力不均匀和应力集中,但是应力与位移的二次微分比例,因此影响到测量精度。

### 三、几个问题

在材料动态力学性质的工作中,有几个影响面较大的问题。

#### (1) 应变率无关理论和应变率有关理论

von Kármán等人提出塑性波理论时,假设应力仅是应变的函数,而与应变率无关,即:

$$\sigma = \sigma(\epsilon)$$

塑性波速  $C^2 = 1/\rho_0 (d\sigma/d\epsilon) = f(\epsilon)$  通过积分:  $\sigma = \int \rho_0 C^2(\epsilon) d\epsilon$  便可算出  $\sigma = \sigma(\epsilon)$ 。但是,要求的就是应力~应变关系,因此,在求这个关系之前,先假定它与 $\dot{\epsilon}$ 无关,自然是武断的,也是不合理的。而且若干实验与这个理论有矛盾:

a, 动态屈服点提高了。

b, 样品预拉后,再加载的波速是弹性波速。

c, 一维应变中,弹性前驱波的幅度不是稳定的(Hugoniot弹性限),而是衰减的,并表现出应力松弛。

为此,提出应变率有关理论:  $\epsilon_\rho = f(\dot{\sigma}, \dot{\epsilon}_\rho)$

或更具体的形式:  $\dot{\epsilon} = \dot{\sigma}/E + g(\sigma, \epsilon) = \dot{\sigma}/E + \dot{\epsilon}_\rho$  即总应变率是由弹性应变率(瞬态反应),和塑性应变率(不是瞬态反应,而有时效)二部分组成的。

解决这个问题一个途径就是弄清塑性应变时效

的物理机制。于是大量关于位错动力学和塑性应变率的工作开展起来了。如Orowan公式,70年前后Taylor等人用这类方法分析了一维应变弹性前驱波的衰减,得到了一些结果。但总的来说,位错参数是很不好测量的,而且它们与应力和应变的关系又是不知道的。Klahn等人还曾举出了二十多个位错动力学机构,并指出,在许多情况下,可以有好几个机构来说明观察到的宏观现象。因此,直接从微观机构来建立本构关系,目前也有相当大的困难。

另一方面Malvern, Cristescu 等人从 $\dot{\epsilon}\rho$ 函数的形式上做了一些工作,如Cristescu 提出 $\frac{\partial \epsilon}{\partial t} = \varphi(\sigma, \epsilon) \frac{\partial \sigma}{\partial t} + \Psi(\sigma, \epsilon)$  但是,目前的实验和计算结果都不足以对这些形式做出判断。

幸好,在小幅度冲击的传播中(在细杆中), $\dot{\epsilon}$ 的变化不会超过一个量级,因此,不用一般的“静”曲线。而用单根动态 $\sigma \sim \epsilon$ 关系(扩充的 $\dot{\epsilon}$ 无关理论)常可提供一个可供实用的 $\sigma \sim \epsilon$ 关系。目前的许多实验就是这样做的。

但是,下面的实验却从物理上,不仅动摇着扩充的 $\dot{\epsilon}$ 无关理论,而且动摇着前述应变率有关理论。

先在一个常应变率下做实验,然后再在另一个应变率下做。另一组实验则反过来,这时发现,实验结果大不相同(图6)。也就是说,材料的性能不仅与应变率有关,而且与应变率的历史有关。

目前的一种尝试是所谓内时性理论(endochronic)。它不用绝对时间来衡量过程,而用一种材料内在的时间变化量(如Valanis用 $d\xi = k^2 dt^2 + g^2 dt^2$ ),作为时间的尺度。H.C.Lin等用这个方法来概括应变率历史效应,这个尝试值得注意。

总而言之,应变率有关理论和应变率无关理论,是材料动态本构关系中一个由来已久的问题。虽然应变率无关理论与一些实验事实矛盾,但它作为一种初级近似,却被许多实验者以推广的形式应用着。应变率有关理论,更符合实际事物过程,但哪些物理因素(如 $\dot{\epsilon}, \dots$ ),是如何起作用的(如历史有关与否)却仍不清楚。故而未达到统一的理论解释。

## (2) Lagrange 分析

动态材料力学实验的一个传统作法是,假设一个材料模型,然后,再通过实验确定材料模型中的待定函数和待定常数。

因此,根据普遍的力学守恒定律,通过实验来建

立本构关系是一个长期的希望。

七十年代以来,发展了称之为Lagrange分析的一套方法,它从一般本构关系的角度,分析了波动的物理过程,并从而找到一种根据实验数据,直接建立本构方程的方法。

由于埋入式的感受元件随样品的某一物质微元一起运动,因此,在整个波动过程中,该探头总具有不变的Lagrange坐标 $h$ 。在不计体积力,热效应时,在一维应变的情况力学方程为

$$\begin{cases} \rho_0 \left( \frac{\partial v}{\partial t} \right)_h - \left( \frac{\partial u}{\partial h} \right)_t = 0 \\ \rho_0 \left( \frac{\partial u}{\partial t} \right)_h - \left( \frac{\partial \sigma}{\partial h} \right)_t = 0 \end{cases} \quad v \text{ 是比容}$$

定义信号的传播速度为 $C_x = \left( \frac{\partial h}{\partial t} \right)_x$ ,  $X$ 为某一力学变量。基本方程可简化为二组等效形式:

$$\begin{cases} \rho_0 C_u = - \left( \frac{\partial u}{\partial v} \right)_h \\ \rho_0 C_\sigma = - \left( \frac{\partial \sigma}{\partial u} \right)_h \end{cases} \quad \begin{cases} \rho_0 C_v = - \left( \frac{\partial u}{\partial v} \right)_t \\ \rho_0 C_u = - \left( \frac{\partial \sigma}{\partial u} \right)_t \end{cases}$$

积分后便得到:

$$\begin{cases} \rho_0 v = - \left( \int \frac{du}{C_u} \right)_h \\ \rho_0 u = - \left( \int \frac{d\sigma}{C_\sigma} \right)_h \end{cases}$$

这告诉我们:(i)在固定质点 $h$ 上,测得力学量 $\sigma$ 和 $\sigma$ 的传播速度 $C_\sigma$ (或 $u$ 和 $C_u$ ),便可积分出另一力学量 $u$ (或 $\sigma$ )。(ii)若被测量是 $\sigma$ ,则可经两次积分,分别得到 $u$ 和 $v$ ;若被测量是 $u$ ,则只能积分出 $v$ ,无法得到 $\sigma$ 。

这样,便可以得到以时间为中间变量的力学变量 $\sigma, u, v$ 和有关量微分之间的关系。

## 四、动态破坏

动态破坏现象虽然大量是从连续到非连续过渡的困难问题,近年来仍获得各方面的重视。主要是为,第一,动载荷下材料破坏与否,比起变形大小要重要得多。一些结构,如防护工事,装甲车辆等,即使变形大点,但只要不破坏就是成功。而另一些结构,如弹壳,即使变形再大,但不破碎,也就不能充分发挥威力。第二,不管本构方程的理论和实验如何不完备,在工程上仍可借鉴静态或加了动态修正的材料力学实验数据,但是对动态破坏,不研究它本身,甚

至最粗略的估计也难以做出来。第三，动态破坏现象面貌独特，便于单刀直入，而不受传统破坏观念的束缚。因此，这方面研究面貌比较活跃。

目前观察到动态破坏包括以下几种形态。(1)大规模塑性流动，(2)裂纹的扩展，(3)崩落，(4)绝热剪切不稳定性。其中第一项基本上是个连续变形过程，前面已有介绍。后三种都是由连续到不连续的转变。

### (1) 裂纹的扩展是动态断裂的一个基本理论和实验问题

实验发现裂纹扩展是个由慢到快的过程(图7)。理论分析和实验表明裂纹扩展速度不会超过瑞雷表面波速。目前的问题有：

a, 分叉。实验发现，裂纹快速扩展，到达某种程度后，单裂纹就突然分叉为几枝，以较慢的速度扩展。到目前为止，这个现象仍未得到满意的理论解释和阐明。

b, 弯曲杆的断裂。Kolsky在做杆的断裂实验时，提出了一个问题：一个受纯弯的杆，在杆的受拉部分产生裂纹。试问裂纹是怎么通过原来的压应力区，以致使一个受纯弯载荷的杆，最后断裂的。Kolsky说，最后的断裂是由于初始断裂造成的压应力脉冲在杆端部反射而成拉脉冲造成的。整个问题的圆满解释还需要进一步的工作。

c, 断裂辐射的应力波。裂纹扩展时，以应力波的方式把能量辐射出去。但目前对断裂和辐射的应力波的关系认识极少，一般只能利用初相和各种波的到时等。Kolsky最近对玻璃块受到Hertz冲击和细杆发生断裂时的应力波做了一些实验工作。

d, 应力波入射于裂纹，如何造成裂纹的扩展。Freuna在这个问题上做了较仔细的分析研究。至今这方面的研究多半是做半无限裂纹的分析问题。更有实际意义的有限长裂纹问题，还是个难题。

e,  $K_{I,d}$ 的测量。目前一般是用三点弯曲的冲击试验，做准静态的处理。结果是 $K_{I,d}$ 随 $\dot{\epsilon}$ 或应力速率先是下降，后是上升(图8)。这要求解释现象的原因，并合理分析这类实验的动态过程，以保证实验的可靠性。

(2) 崩落 崩落和其它应力波在自由面反射和相交引起的动态破坏现象，如开裂，角裂等，是很突出的一种动态破坏。它具有以下几个特点。

a, 裂纹扩展和断裂仅与局部的拉应力有关，而与整个应力场关系不大。裂纹的扩展方向大致垂直于局部拉应力的方向。

b, 时效，在应力波作用下，材料是否发生断裂，不仅和应力的大小有关，而且和应力持续的时间长短

有关。对较低的应力，材料可支撑较长的时间，而对较高的应力，则支撑时间较短。

c, 集体效果。崩落不是单个裂纹扩展的结果。因为在崩落过程中没有那么长的时间足以使得单一裂纹传到远处。显微观察表明，它是许多个小裂纹或小孔穴形成、发展、连结，最后形成崩落的现象。

d, 在崩落以前，材料已被压缩波掠过，往往伴随着发生了塑性流动，应力松弛等，这就改变了材料的状况。因此，准确地确定发生崩落前材料的状况，是很困难的。

对崩落的研究，目前主要包括几个内容：

a, 破坏时的材料状态。这包括载荷的历史，变形的历史，微观结构受这些历史影响的方式等。

b, 破坏准则。一般说来，构作崩落准则要联系四类物理量：应力状态，受应力的区域，临界应力，有效能量。但是，通常这四种量都不能在破坏前确定。因此，常常构作各种理想化的模型。这种模型准则有宏观唯象的，如最大拉应力准则，应力梯度准则，冲量型准则，应力率准则，累积破坏准则等。或者是微观统计的，如Stanford研究所的工作。

c, 冶金学因素的影响和微观观察。这类工作是建立各种准则的实验基础。也是预告和改进材料抗破坏性能的重要途径。国外用扫描电镜等工具，对各种缺陷，孔穴，晶界，夹杂等做过大量观察，并提出了一些控制方案，如使晶粒细致，密实，消除大的夹杂，微裂缝，孔洞，造成随机的结构等。

(3) 绝热剪切不稳定性 在承受弹道或炸药爆炸的金属和合金中，常见到有很薄的大剪切变形区。由于动态过程很快，塑性功便绝热地加热着这个区域，造成该区的热软化，以至剪切变形更容易发生，并恶性循环，因此称为绝热剪切不稳定性。

目前大量的工作是做显微观察和分析，弄清楚基本的物理特征。已表明，绝热剪切和断裂是既相关又不同的现象，在显微照片上，断裂是张开的，发生在压缩消失之后，而绝热剪切在压缩条件就可产生。绝热剪切造成两种不同的形态，其一是大变形，其二是永久性的结构变化。Stanford研究所也做了基于微观统计的绝热剪切不稳定性模型的研究工作。

关于绝热剪切的宏观准则。目前工作还不多，基本上是两大类。一类是最大塑性功，另一类是极限剪切变形条件。实验方法主要是做冲击剪切。目前给出的数据较少，即使如此，有的数据还相互矛盾。如Setzman给出塑性功为 $1.56 \times 10^8$ 尔格/克(4130钢)， $2.1 \times 10^8$ 尔格/克(0024-T<sub>3</sub>铝)，Culver给出的临界剪应变为1.20(钢)和0.35(铝)。

下面再介绍一下，动态破坏研究中，比较新的一些设想。

一类是美国Stanford研究所一批人倡导的速率统计理论。他们的基本观点是，对于很脆的准静态断裂，不可逆速率过程的区域比宏观裂缝尺寸和试件尺寸小得多。这时，断裂所需的能量是材料的性质，经典的能量平衡方法是可取的。但对多数结构材料，这个区域可以很大，常常还包含许多微孔穴和裂缝，而不是单个的宏观裂缝。对于这种情况，及许多裂纹同时活化的动载情况，断裂能不再是材料的性质，微观速率理论就是一个重要的工具了。

目前他们主要针对动态破坏中的崩落和绝热剪切，把他们的设想具体化，提出了所谓NAG-FRAG和SNAG方法。他们已用到一个装了炸药的钢筒是如何爆裂，破碎成弹片的例子中。

这个理论力图通过微观破裂过程及其统计规律的研究，弥补连续介质力学方法之不足，并通过理解微观结构在断裂过程中的作用，来寻找合理设计、研制和使用材料的途径。这一点是值得重视的。

第二类是日本户田盛和提出的凝子(Soliton)造成的非线性破坏，用以解释材料发生粉碎性破坏的过程。

凝子是近几年发展起来的一个应用科学新概念。在非线性质色散介质中(包括户田链)，可以存在一种渐近的稳定波形——凝子。凝子不仅自身稳定，而且和其它凝子相交后，不改变自身的性质，就好像一个

粒子一样。而初始任意一个波形，总会分裂为几个凝子。

凝子被认为是一种能量的集聚。因此设想材料的破坏是由于凝子在材料的自由面反射和相互作用所引起的。户田介绍了一个数字计算的模型实验。采用户田的势函数，计算40个点子的链。一端固定，一端自由。初始使自由端的第一个点子脱离链子。结果发现，整个链子逐渐断裂直至粉碎(图9)。这是一种大胆的设计，可供开阔思路。

## 结 束 语

根据实际需要的紧迫程度和实验，测试设备的可能性，以及对动态材料力学性质研究的意义，以下几方面值得重视。

(1) 动态破坏的研究。其重要性已如前述。

(2) 各类新材料的研究。已有的研究结果，大多是在纯金属上积累起来的，但现在大量新型材料涌入实际工程，这个趋势还要发展，因此很有重视的必要。

(3) 设计和完善一些能为工程部门接受的，简便易行的实验和分析方法(如SHPB)，并积累一些基本数据。

(4) 设计一些新的实验，判明哪些物理因素，用何种方式影响着动态材料力学性质，以得到一些启发性的认识，从物性上阐明这些性质，并建立合理的材料模型。

## 附 图

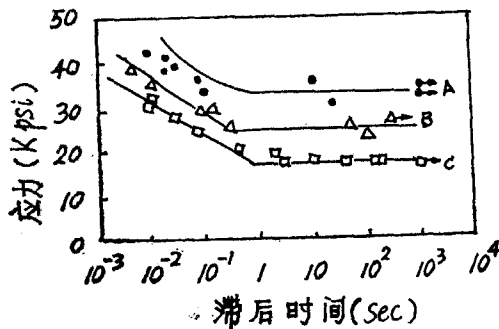


图1. 低碳钢屈服的滞后时间  
平均晶粒直径: A.  $2.8\mu\text{m}$ ; B.  $64\mu\text{m}$ ;  
C.  $109\mu\text{m}$ 。

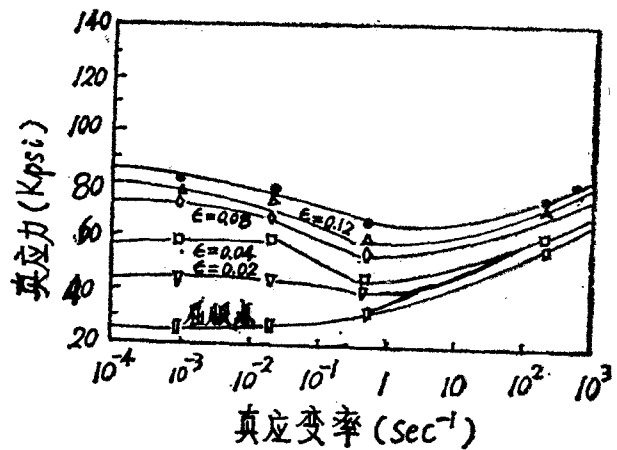


图2.  $T = 197^\circ\text{C}$ 时软钢流动应力随应变和应变率的变化

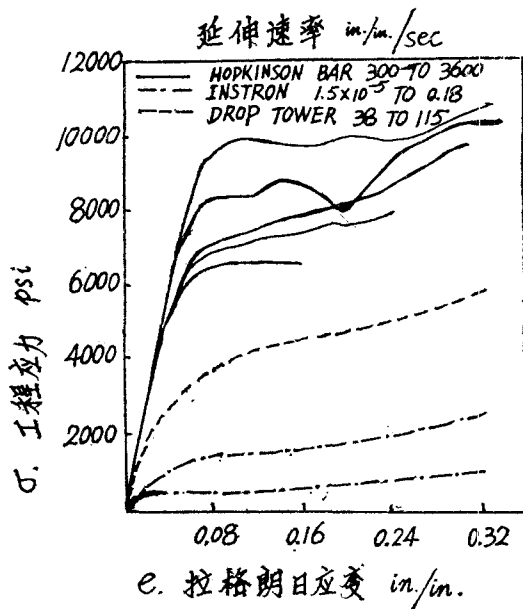


图3. 聚脂-苯乙烯共聚物试样的应力-应变曲线

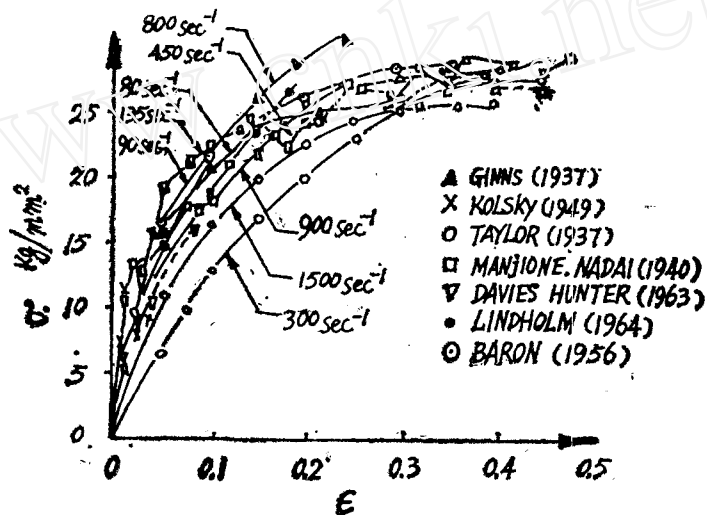


图4. 退火多晶铜的“准静态”冲击拉伸和压缩的试验应力-应变曲线，应变率是实验者各自给出的

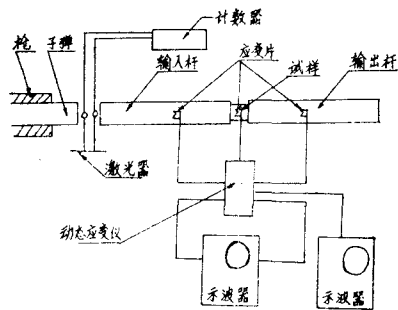


图5. 分段霍布金生压力杆简图

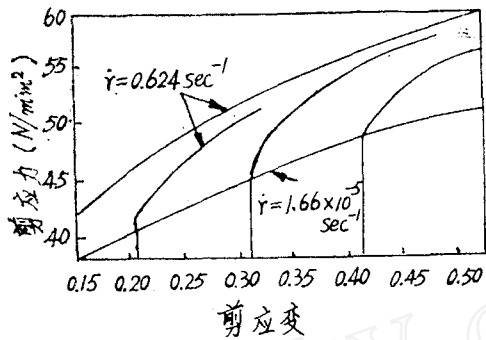
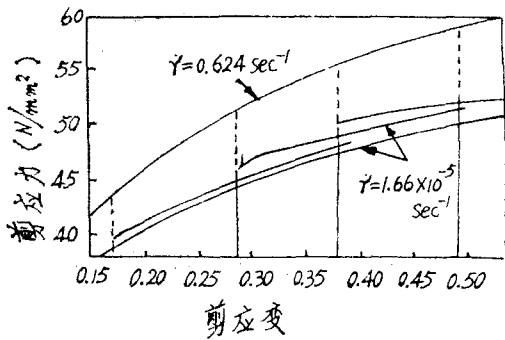


图6. 上: 退火铝合金(99.8%铝)在两个常应变率相先进行高应变率而后进行低应变率试验时的应力—应变曲线  
下: 退火铝合金(99.8%铝)在两个常应变率相先进行低应变率而后进行高应变率试验时应力—应变曲线

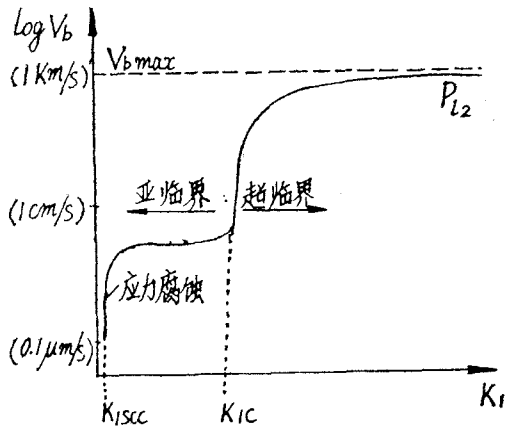
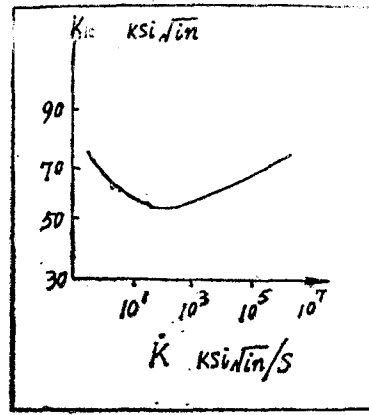


图7. 破裂速度  $V_b$  作为应力强度因子  $K_I$  的函数



4.25% Ni-Cr-Mo 钢

图8. 加载速率 ( $\dot{K}$ ) 对  $K_{Ic}$  的影响

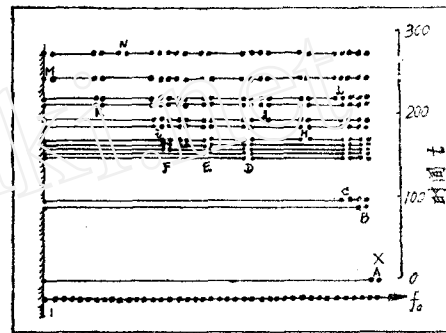


图9. 由40个单元组成的非线性格子破坏的例子

## 附 录

最近材料动态力学性质研究的书目和综合文献会议录

1. "Metallurgical Effects at High Strain Rates", ed. by R.W. Rohoe et. 1973.
2. "Mechanical Properties at High Rates of Strain", ed. by J. Harding, 1974, 这次国际性会议录, 包括实验技术, 波和断裂, 结构动载响应和应用四部分。
3. "Propagation of shock waves in solids", ed. by E. Varley, 1976, 由ASME主办。
4. "Dynamic Crack Propagation", ed. by G. C. Sih, 1972, at Lehigh Univ., USA.
5. "Shock Waves and the Mechanical Pro-

erties of Solids”, ed. by J. J. Burke, 1970, 是美国陆军材料研究的学术会议录, 包括金属, 聚合物, 复合材料, 多孔材料, 岩石和陶瓷以及动态断裂的问题。

6. “Mechanical Behaviour of Material under Dynamic Loading”, ed. by U.S. Lindholm, 1968.

专著

1. Bell, J.F., “Experimental Foundations of Solid Mechanics”, 见 “Handbuch der Physik”, ed. by S. Flugge, V. VIa/1, 1974, 是固体力学实验技术综述。
2. Chou, P.C., Hopkins, A.K., “Dynamic Response of Materials to Intense Impulsive Loading”, 1972, 是 Duvell, G. E. 数人合写的关于一维应变实验的专著。
3. Johnson, W., “Impact Strength of Materials”, 1971, 适于工程应用。
4. Compbell, J.D., “Dynamic Plasticity”

(1973) .

5. Wasley, A.J., “Stress Wave Propagation in Solid” (1973), 是本初等理论书。

综合文献

1. Harding, J., “Shock Proragation in Solid”, *Sci. Prog. (GB)* 63, 252 (1976), 575.
2. Compbell, J.D., “Dynamic Plasticity: Macroscopic & Microscopic Aspects”, *Mat. Sci. Eng.*, 13 (1973), 1.
3. Curren, D.R., “Dynamic Failure in Solids”, *Physics Today*, 30, 1 (1977), 17.
4. 泽冈昭, “最近の超高速飞翔体の研究, 工业火药, 38 (昭和52年), 21.
5. Koloky, H., The Role of Experiment in the Development of Solid Mechanics — Some Examples, *Advances in Appl. Mech.*, 16 (1976), 303.

## 地震孕育发展的力学过程和地震预报

中国科学院力学研究所 王震鸣

地震的孕育发展, 主要是和地壳的受力、变形、能量的逐步积累和集中、岩层突然断裂和错动、应变能释放、发生地震及震后的调整等有关的力学过程, 同时伴随着地球物理、地球化学的变化, 并且是与大气物理、天体物理等有联系的复杂过程。

地震力的产生, 与地球自转速率的变化、地球内部物质的流动与能量的转化等因素有关, 是一个复杂的尚未完全弄清的问题。

地震和地壳岩层的断裂有关, 这取决于使岩层破裂的地应力和岩层抵抗破裂的强度这一对矛盾。地震孕育发展的力学过程, 就是这对矛盾既对立又统一的变化过程。影响地应力大小、方向和分布情况等变化的因素很多, 如地壳构造运动的强度和规模, 应变和应变能积累的速度, 岩层的屈伏与变形, 断层的粘滑和蠕动, 地幔中水平力(可引起地壳拉、压、剪、扭等)的变化, 温度场的变化, 岩层的围压和孔隙中流体压力的变化, 天体引力、旱涝、气压的变化及其他

能使地壳水平线垂直方向应力增加或变得不均匀的因素, 它是矛盾的主导方面。影响岩层强度变化的因素也很多, 如所受应力的大小, 作用时间的长短, 加载速度, 应变率, 温度的变化, 岩石结晶的改变, 蛇纹岩的脱水变脆, 地下水渗入使岩石变弱, 围压和孔隙压的变化, 裂隙的产生与扩展, 受力状态的变化等, 它是矛盾的非主导方面, 但在一定情况下, 也可起重要的决定性的作用。如岩层中的应力增加, 或岩层的强度减弱, 或两者同时发生, 则容易产生破裂, 反之则不易产生破裂。如地应力仅在局部超过岩层强度, 而在总体上, 在未来的总破裂面上还未超过岩层强度, 则仅引起小范围的断裂, 产生局部的小震或滑动, 一旦地应力不单在局部而且在某一大断面上也超过岩层的强度, 且积累的应变能已很大, 则处于临界状态的岩层局部的破裂, 会引起地壳岩层大规模的破裂, 发生大地震。

由于地壳构造和岩层性质(力学、物理和化学性质