

# 动态塑性试验技术\*

王 敏 杰  
(大连工学院)

**提要** 对动态塑性试验技术作了扼要综述。简单介绍了各种试验方法的基本原理及其应用范围,并评述了各自所具有的特点和不足之处。

**关键词** 动态塑性; 试验技术; 应变; 应变率

## 1. 引言

50年代以前,人们着重于低应变率条件下材料性能的研究。随着科学和生产技术的迅速发展,材料动态塑性性能的研究显得日益重要,机械加工、爆炸成型、穿甲、裂纹传播以及结构工程等范围广泛的实际问题,都需要认识材料动态塑性性能。这些问题涉及到在大应变、高应变率条件下材料性能的研究,也是塑性动力学理论的基础,因此越来越受到重视。在应变率小于 $10^3\text{s}^{-1}$ 的范围内,测定应变率影响的试验技术渐趋成熟(变形方式包括双轴和三轴应力状态),试验方面的努力往往超过理论方面的努力<sup>[1]</sup>。应变率超过 $10^3\text{s}^{-1}$ ,由于涉及到微观组织的影响和难以处理的时间尺度,所以理论和试验技术都需要进一步发展。本文旨在扼要介绍已有的各种动态塑性试验技术,以便初步了解这方面的研究和发展。

几种动态塑性试验所能达到的参数范围见表1。

表 1 几种动态塑性试验参数范围

试验方法	应变 (%)	应变率 ( $\text{s}^{-1}$ )	温度 (K)	试 验 材 料
凸轮塑性仪	-70	$10^{-3}-10^2$	273-1473	有色金属, 黑色金属
落 锤	50-100	$10-10^3$	293-1373	有色金属, 黑色金属
SHB	1-1000	$10^2-10^5$	293-1173	有色金属, 黑色金属, 非金属材料
压剪撞击	-15	$10^5$	—	有色金属
正交切削	50-500	$10^2-10^6$	—	有色金属, 黑色金属

\* 中国科学院自然科学基金资助的课题。

## 2. 蓄能式试验机

贮存的机械能可以用于应变率大于准静态范围的试验研究。最普通的蓄能式试验机是利用运动物体的动能（如摆锤、落锤、飞轮等），向试件提供高的瞬时变形功率，例如试件在 $10^3\text{MPa}$ 的应力和 $10^2\text{s}^{-1}$ 的应变率下变形时就需要 $100\text{kW}$ 的功率。

凸轮塑性仪（图1）是一种利用旋转飞轮作为能量贮存的蓄能试验机。最早使用凸轮塑性仪的有 Loizou & Sims<sup>[2]</sup>，Hockett<sup>[3]</sup>等，这种装置设计有一个对数型凸轮，与旋转飞轮相连，提供对试样的压缩载荷。试样位于两块淬火钢板之间，下面的板由凸轮驱动向上移动，上面的板与载荷测量仪固定在一起。用这种方法可以获得恒定的应变率。从统计数字<sup>[4]</sup>来看，使用凸轮塑性仪所能获得的最大应变率可达 $10^2\text{s}^{-1}$ 数量级，最大应变可达0.7。但是，这种方法在试验开始阶段会有冲击振荡，影响数据记录精度。

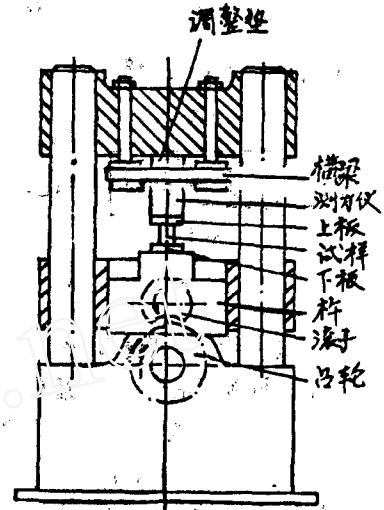


图1 凸轮塑性仪简图

在中等应变率范围，许多研究者使用了落锤。落锤试验的原理是很明了的，如图2所示。用这种装置所能得到的应变率高于凸轮塑性仪，可达 $10^3\text{s}^{-1}$ ，最大真应变可达1.0<sup>[4]</sup>。但是，应当注意，在落锤试验过程中，应变率不是恒定的，尤其是在大应变情况下。所以，使用这种装置得到的结果通常都是指平均应变率。在1978年，Holzer<sup>[9]</sup>使用落锤对两种钢进行了试验，由于使锤体的能量远远超过试样变形所需能量，结果表明，整个试验过程中应变率并不降低。

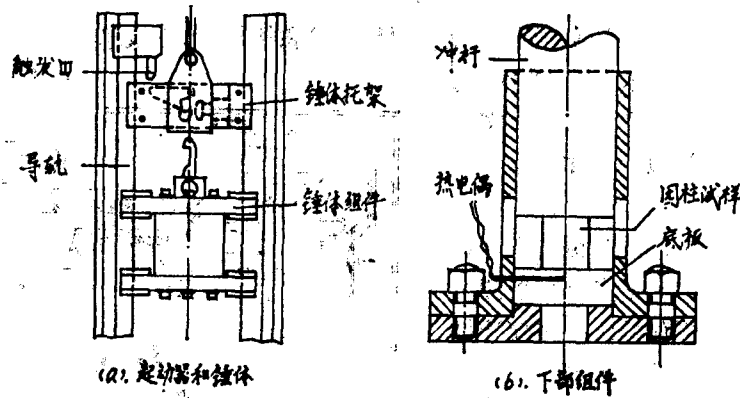


图2 落锤试验装置<sup>[5]</sup>

此外，适用于低应变率的液压试验机和压缩气体试验机在中等应变率范围也有所应用。

蓄能式试验机一般适用于中等应变率（ $10^{-1}$ — $10^2\text{s}^{-1}$ ），在此范围内，为了测量载荷和变形，测量记录仪器需要有 $10\text{kHz}$ 数量级的频率响应，因此，几乎都是采用示波器记录。对于中等应变率试验机来说，最主要的问题是，在机械系统和液压系统应提供足够的刚度以避免共振，

### 3. 分离式 Hopkinson 杆技术

应变率高于  $10^2 \text{s}^{-1}$  时, 在试验机或载荷测量装置中, 会出现难以避免的振动、惯性和波效应, 因此试验装置必须设计成能够考虑或估计这些效应。Kolsky<sup>[7]</sup> 1949年首先提出的

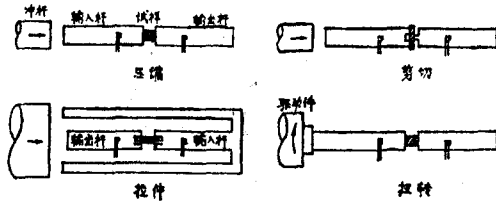


图3 分离式 Hopkinson 杆示意图

分离式 Hopkinson 压杆 (split Hopkinson pressure bar, 简称 SHPB) 技术, 巧妙地解决了这些问题。这种装置利用两根弹性长杆, 即输入杆和输出杆, 把试样夹在中间 (图3), 借助于一个弹性压力脉冲波传过该系统的方法给压缩试样加载, 使试样变形到塑性状态。这个脉冲波的一部分以透射方式

通过试样传入输出杆, 另一部分从界面反射回输入杆。记录透射波可以测量试样所受载荷, 而根据弹性杆中波传播理论, 通过最初的入射波和反射波记录, 就可以计算出试样两个界面的位移, 从而确定平均应变率和应变。

一维弹性波传播理论是设计分离式 Hopkinson 杆 (简称 SHB) 装置的理论依据, 所以, 呈弹性状态的输入杆和输出杆相对于加载脉冲波长应当是长的, 而为了保证沿试样长度应力和应变的均匀性, 试样长度相对于加载脉冲波长应当尽可能地短。

SHB技术经过许多研究者的改进和完善, 已经应用于压缩、拉伸、直接剪切和扭转 (图3), 而且也被一些学者用于扭转和压缩同时发生的试验以及动态轴向压缩和静态径向围压联合作用的情况<sup>[1]</sup>。从大量的使用结果来看, 压缩型 SHB 和扭转型 SHB 是两种比较典型的 SHB 试验方法, 应用较为广泛。压缩 SHB 技术比较完善, 扭转 SHB 技术则是一种有前途的方法。

为了研究金属切削过程中大应变、高应变率和高温条件下的塑性变形机理, 白井英治<sup>[2]</sup> 和 Stevenson<sup>[9]</sup> 也分别发展了压缩 SHB 技术和扭转 SHB 技术, 以下分别介绍。

3.1 压缩 SHB 技术 压缩 SHB 的理论分析已由 Hauser<sup>[10]</sup> 完成, 文献 [8], [11] 也做了类似的工作, 这里不再赘述。压缩 SHB 技术的加载方法有爆炸法和机械冲击法, 应变测量有电容法、电阻应变片法、绕射光栅直接测量法和干涉应变仪直接测量法。应变计算采用运算放大器直接记录应变。

白井英治<sup>[12]</sup> 采用的压缩 SHB 试验装置类似于 Hauser 的方法, 图4是其试验装置略图。一个小的圆柱形试样由高频线圈迅速加热, 压缩空气发射冲击杆使试样产生应变, 应变值由挡块控制, 改变挡块尺寸, 不断重复这个过程, 直到试样达到所需应变为止。选择

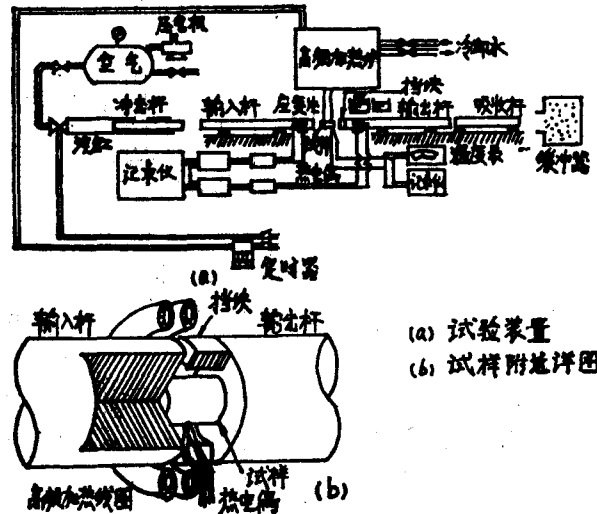


图4 压缩 SHB 装置简图

这种逐渐增加应变法的理由是：①当金属在象切削过程那样不同的应变率和温度下变形时，塑性流动应力具有随应变率和温度而变化的效应，由于在每一次冲击时可以改变应变率和温度，所以用这种逐渐增加应变的方法可以模拟金属切削的实际情况。②由于应变率的不均匀性和在应变时有热量产生，在应变率和温度不变的条件下，单一的冲击试验难于得到较大的变形。

相对于较长的波长，采用长度较短的试样，忽略波的传播效应，产生均匀应力，使试样处于准静态。这种假设是压缩 SHB 技术的基础。但是，弹性杆中一维波对于不比杆径大的波长会显示出几何弥散。这样，波阵面很陡的应力脉冲就不能借助这些一维波来传播和测量，因此使高应变率试验受到局限。压缩 SHB 技术的另一个问题是试件在变形时的径向膨胀，这种膨胀以端面摩擦和径向惯性两种方式影响试样中的应力。端面摩擦效应可以通过有效地润滑使之降低到最小程度，但径向惯性使求得精确的应变率受到局限。再者，当应变增大时，由于试样膨胀，使试样内的应变分布变得越来越不均匀。

3.2 扭转 SHB 技术 扭转 SHB 技术的出现是 SHB 技术的一个重要发展，压缩 SHB 技术所遇到的困难和局限，如波传播的几何弥散，试样的端面摩擦、径向惯性以及应变的几何不均性都随之避免。因此有可能进行具有很大应变的高应变率试验，适合于研究金属成型和切削加工的塑性变形机理。

扭转 SHB 技术的工作原理和理论分析与压缩 SHB 技术不同之处，是以纯扭转形式代替了压缩形式。这种技术的加载方法有爆炸法和释放预加扭矩法，应变测量有电阻应变片法和摩尔云纹法。

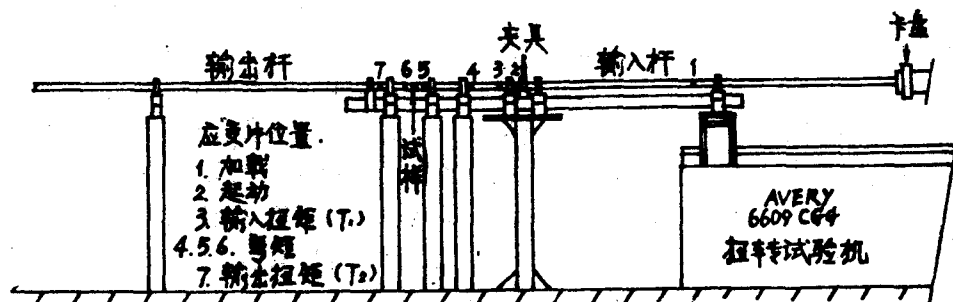


图5 扭转 SHB 装置简图

Stevenson 等<sup>[13]</sup> 在 Lewis & Campell<sup>[14]</sup> 工作的基础上，改进和发展了扭转 SHB 技术，其试验装置的工作原理如图 5 所示。薄壁圆环试样用环氧树脂胶粘在输入杆和输出杆之间，杆是  $\phi 25.4\text{mm}$  的 230 钛合金（含铜 2.5%）实心均质杆。试样的动态加载过程是，在接近试样处有一个止动夹具，它通过一个中间带环形槽的螺杆夹紧输入杆，然后在输入杆的一端，由电动机经减速器借助卡盘使其作弹性扭转，贮存预先确定的扭矩，扭矩大小由应变片 1 测量。试验开始，继续拧紧带槽螺杆，直至断裂。夹具突然释放，一个均匀的大小等于二分之一贮存扭矩的扭转脉冲作为加载波沿输入杆传播，波的大小由应变片 3 测量。如果这个加载波足够大，就会导致试样的有效截面扭成塑性流动区，相当于试样塑性剪应力的部分扭矩波传入输出杆，由应变片 7 测量。试样朝相同方向继续扭转，直到这部分扭矩波从系统的另

一端反射回试样。杆愈长,扭转试验持续时间愈久。对于给定应变率,试验的势应变与试验持续时间成正比。对于该系统的杆长,试验持续时间可达 $10^{-3}$ s,如果剪应变率大于 $10^3$ s $^{-1}$ ,那么就可以得到大于1的剪应变。试样中的剪应变率为

$$\dot{\gamma} = \frac{2(T_1 - T_2)}{J\rho c} \frac{r_m}{l} \quad (1)$$

式中, $T_1$ 是输入扭矩, $T_2$ 是输出扭矩, $J$ 是杆的面积极坐标二阶矩, $\rho$ 是杆密度, $c$ 是扭转波速, $r_m$ 是试样平均半径, $l$ 是试样的有效测量长度。这样,如果试样几何尺寸给定,就可以通过输入扭矩 $T_1$ 控制应变率。绝热引起的加工硬化和热软化可能导致 $T_2$ 在试验中发生变化,但由于 $T_1 \gg T_2$ ,所以,应变率仍保持基本恒定。

扭转SHB系统的优点是避免了径向惯性效应和应变的不均匀性,杆中一次弹性波的传播不存在弥散,而且势应变与应变率耦合,因此,得以在高应变率条件下进行大应变试验。

扭转SHB系统存在的主要技术问题是弯曲波的介入。与Lewis & Campbell<sup>[14]</sup>的装置相比,Stevenson等在装置的设计中,研制了一种新的夹具,改进了夹具和支承的排列,在夹具两侧增加了支承,改用箱式支承座,并且用钢支承代替聚四氟乙烯支承,以增加刚性,最后用激光定向仪校正支承位置,其目的都是为了给予试样一个稳定的输入扭矩,减小不希望有的弯曲波。弯曲波的危险是导致试样塑性弯曲,而应变片4,5,6则是用于监测系统中存在的弯矩值。

从已有资料介绍来看,应用SHB技术可以测定 $10^2$ — $10^5$ s $^{-1}$ 应变率范围内的应力应变关系。但是应变率超过 $10^4$ s $^{-1}$ 时,有必要对这种技术中所作的假定进行严格的检验。SHB技术的局限性主要在于:①理论分析假设了变形试样的平衡条件,但由于弥散效应,在试验的最初几微秒内,这种条件并不存在。所以,试验得到的低应变值数据先天性地不可靠,合理设计装置有所改善,但问题是只能减小,不能消除。②试验中,如果输入杆发生塑性变形,现有分析就不再适用,即试样与杆的接触面位置不能完全由弹性方程确定。③塑性波在试样中的传播分析表明,对于应变率不敏感的材料,传播速度慢的塑性波会使材料的内在性质发生畸变。④试验装置的操作和记录的整理分析难度大,需要对机械系统和电子系统全面了解。因此,把这种方法作为常规材料试验就受到局限。

#### 4. 短程压电晶体测力传感器

在高应变率材料性能试验中,短程压电晶体测力传感器的应用,近来引起人们的注意。一些研究者<sup>[15,16]</sup>认为,测力系统在屈服应力附近的严重波动可能掩盖高应变率条件下的屈服过程真相,这样就使所得结果难以解释。对于广泛用于记录短时应力脉冲的SHB技术,也局限于必须假设输入输出杆保持弹性,而其得到的力也仅仅是在所给脉冲时间内的平均值。Woodward & Brown<sup>[16]</sup>提出一种使用短程环形压电晶体测力传感器的高应变率压缩试验方法,由于测力系统具有高频响应,因此可以测得应变率高达 $10^4$ s $^{-1}$ 的瞬态力-时间关系。如图6(a)所示,试验是在一个惯性气压试验台上进行,分别与两个驱动活塞相连的支撑体A和J相向运动,试样I受压,C为控制变形量的衬垫,当板M与模座B接触时,试验停止。图中D为短程环形压电晶体测力传感器,位移测量采用Fotonic探测器,两束光导纤维分别作为光源和集光器,借助于板G反射的光强测得位移。Holzer<sup>[6]</sup>在落锤试验里也使

用了短程环形压电晶体测力传感器 (图 6(b)), 其原理与 Woodward & Brown<sup>[16]</sup> 的方法基本相同。但在这些方法中, 常见的端面摩擦, 径向惯性, 试样内的塑性波传播和绝热效应依然存在。

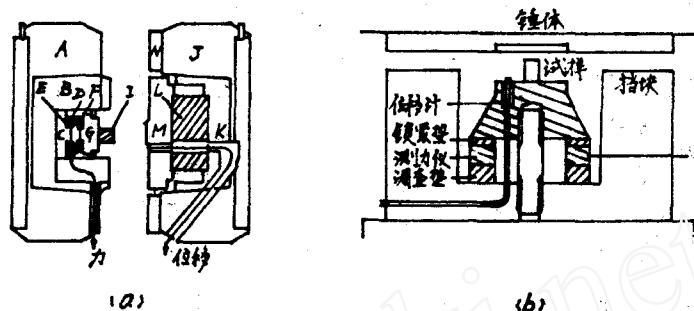


图 6 短程压电晶体测力传感器的应用

### 5. 动态膨胀环试验

动态膨胀环试验是一种避免在试样或应变施加装置中形成显著应力波的材料性能试验方法, 一个自由的薄壁圆环由径向脉冲加载产生对称的动态膨胀。加载方法有液体驱动法、爆炸法和电磁法。Hoggatt & Recht<sup>[17]</sup> 首先提出利用炸药爆炸加载, 所用试样组件如图 7 所示, 薄壁圆环试样热压在一个淬火钢芯上, 钢芯制有一个装填高爆炸药的内腔。爆炸时, 一个压力冲击波通过钢芯和试样向外径向传播。当这个冲击波到达薄壁圆环的外表面时, 便作为一个拉力波又反射回圆环与钢芯的接触面, 由于试样的动量作用, 圆环与钢芯分离, 此后圆环靠本身的惯性继续径向膨胀。根据圆环的外径、内径和径向减速度可以确定试样的周向应力。膨胀环连续的位移-时间关系利用超高速扫描摄影机



图 7 爆炸膨胀环

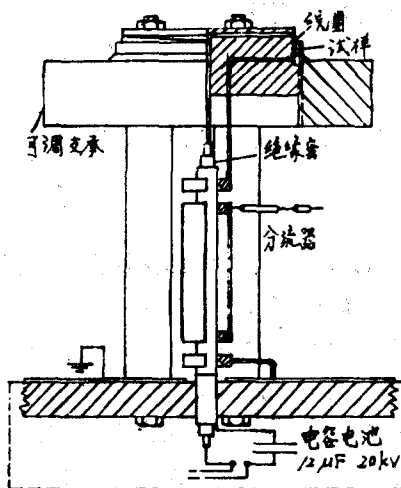


图 8 电磁膨胀环

记录, 试验应变率可以达到  $10^4 \text{s}^{-1}$ 。Niordson<sup>[18]</sup> 的膨胀环试验则是利用电容器组突然放电的电磁方法产生力脉冲, 如图 8 所示, 一个与电容电池相连的刚性感应圈装在圆环试样里, 当足够强的电流通过线圈时, 由于试样内感应电流与线圈内原始电流的互相作用, 在圆环与线圈之间便产生对称的径向载荷, 使圆环膨胀, 产生高应变率变形直至破坏。一些研究者<sup>[1,4,16]</sup> 已经对动态膨胀环技术作了评价。总的来说, 尽管这种方法能够避免应力集中, 但由于径向应力的作用, 圆环迅速减速。因此, 初始高应变率将非常快地下降。而且, 因为

减速度要由对实测的位移-时间关系作二次微分求得, 所以, 根据圆环径向减速度计算所得周向应力的精度受到很大限制。此外, 应变的连续测量也不象 SHB 技术那么容易做到。

## 6. 压剪撞击试验

Clifton 及其同事<sup>[19-21]</sup>应用一维平面波传播理论, 研制了压剪撞击试验装置, 以获得

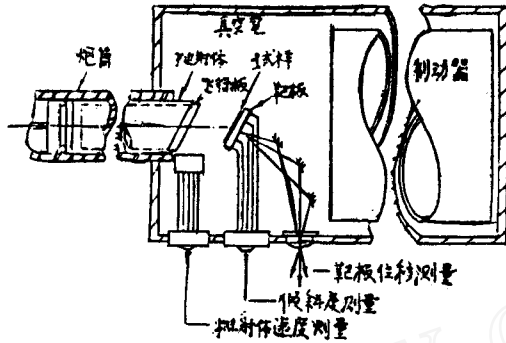


图9 压剪撞击试验简图

复合应力状态下材料的高应变率特性。试验系统如图9所示, 厚度约0.2—0.4mm的薄片试样夹在飞行板和靶板两块硬板之间, 飞行板、试样板和靶板三者平行, 且与炮筒轴线倾斜一定角度。试验时, 安装在抛射体前部的飞行板沿单级压气炮的炮筒加速、撞击试样, 产生压剪复合平面波, 使试样塑性变形, 而飞行板和靶板则一直处于弹性状态。在抛射体后部, 通过导向键防止抛射体绕其轴线转动。

飞行板撞击试样之后, 撞击面粒子速度的变化产生波效应, 这些波通过靶板传播, 并从其背面反射。撞击面和靶板背面的粒子速度有垂直和平行于撞击平面的两个分量, 即法向分量和面内分量。通过测量飞行板速度的法向分量  $u_0$ , 面内分量  $v_0$  和靶板背面粒子速度的法向分量  $u$ , 面内分量  $v$ , 可以计算试样的法向应变率和剪切应变率为

$$\dot{\epsilon} = \frac{u_0 - u}{h}, \quad \dot{\gamma} = \frac{v_0 - v}{h} \quad (2)$$

式中,  $h$  为试样厚度。试样的正应力和剪应力为

$$\sigma = \frac{1}{2} \rho c_1 u, \quad \tau = \frac{1}{2} \rho c_2 v \quad (3)$$

式中  $\rho$ ,  $c_1$ ,  $c_2$  分别为靶板材料密度、弹性纵波速度和弹性剪切波速度。对式(2)积分, 即可获得法向应变和剪切应变。

整个试验系统的测量包括抛射体速度(即飞行速度), 靶板背面的粒子运动和两个撞击平面之间的倾斜度。抛射体速度使用由三个红外光电二极管检测器组成的光学检测系统测量, 靶板背面粒子运动的法向分量和面内分量分别利用速度干涉仪和横向位移干涉仪测量, 撞击面之间的倾斜度通过测量飞行板与靶板上四个斜度销的接触时间差获得。

由于压剪撞击试验的理论基础是一维平面波传播, 因此要求飞行板、试样板和靶板之间应有很高的平行度, 各板的厚度相对其径向尺寸也要尽量薄。而且为了保证试样的均匀塑性变形, 试样要薄, 飞行板和靶板要硬。

压剪撞击试验的主要特点是能够获得复合应力状态, 并且可达  $10^6 \text{s}^{-1}$  量级的高应变率。但能够达到的应变范围较小, 比理论预测大的前驱波衰减也有待进一步研究。

## 7. 正交切削试验方法

利用拉伸、压缩或扭转等方法对材料进行高应变率的性能试验, 涉及到一些动态高速加载形式, 这些形式在测量和结果分析上都遇到了相当大的困难。因此, 一些研究者<sup>[22-26]</sup>尝

试把正交切削试验作为一种材料性能试验方法，测量金属材料的高应变率特性，因为在金属切削过程中应变率可以高达  $10^3-10^6s^{-1}$ 。这种方法基于试验材料连续通过变形区，因而系统处于稳定状态。在强烈的塑性变形区产生高应变率的同时，用于计算应力的切削力保持稳定，这样就有充足的时间用于测量。

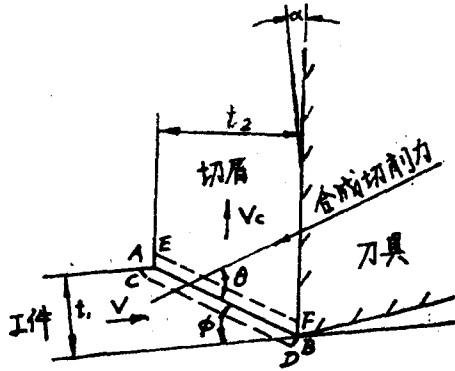


图 10 正交切削模型

正交切削试验模型如图10所示，试件材料相对切削刀具，连续通过变形区CDFE产生压剪塑性变形。在变形区CDFE内，材料会产生应变硬化，因此用

$$\sigma = \sigma_1 \epsilon^n \quad (4)$$

表示材料的应力应变关系。对于给定试验材料和切削条件，通过测量变形区几何参数和切削力，求得对应的应力、应变和应变率值。改变切削条件，应变率变化，可得到不同的  $\sigma_1$  和  $n$ 。

Stevenson & Oxley<sup>[24]</sup> 对于易切钢，在应变率  $10^3-10^5s^{-1}$  范围内进行了正交切削试验，经过绝热修正后，结果与应变率低于  $10^3s^{-1}$  的压缩试验结果能够很好衔接。Wright & Robinson<sup>[25]</sup> 用同样的方法对铜进行了试验，应变率达到  $4 \times 10^4s^{-1}$ 。力学试验与切削试验的结果对比<sup>[26]</sup> 表明，如果二者结合起来，可以较好地认识材料塑性变形的宏观和微观机理。

作为一种材料性能试验，正交切削试验方法的不足之处是只给出平均应力值，应变率难以独立于切削过程来确定。因此，有必要对切削过程进一步认识。

## 8. 结 语

纵观所述各种动态塑性试验技术，目前还没有哪一种试验方法能够达到完美无缺的程度。尽管分离式 Hopkinson 杆技术在动态塑性试验领域中仍占主导地位，但对于包括这种技术在内的各种动态塑性试验，在高应变率条件下，由于时间尺度所导致的测量、结果分析等困难，至今还不能完全克服。近似于稳态过程的正交切削试验方法，往往可以避免动态试验所遇到的一些问题，特别是对于应变率高于  $10^3s^{-1}$ ，研究高应变率和热效应条件下的材料性能以及塑性变形的宏观与微观机理，研究金属加工过程的变形，包括辊压、挤压、拉拔等，是对现有材料性能试验技术的较好补充。

总之，关于高应变率动态塑性试验技术，无论对于塑性动力学的理论研究，还是对于实际工程的需要，都亟待进一步发展。在此领域，中国科学院力学研究所，中国科技大学和太原工业大学等，已经相继开展了较为深入的研究。

作者衷心感谢导师刘培德教授和胡荣生教授的悉心指导及对本文的审阅。

## 参 考 文 献

- 1 Lindholm U S. Mechanical Properties at High Rates of Strain. Proc. Conf. Mech. Properties of Mater. at High Rates of Strain, Oxford (1974)
- 2 Loizou N, Sims R B. J. Mech. and Phys. of Solids, 1 (1953): 234-243
- 3 Hockett J E. Proc. ASTM. 59 (1959): 1309-1317



- 4 Holzer A J. *Trans. ASME (H)*, **101** (1979): 231—237
- 5 Baraya G L, Johnson W, Slater R A C. *Int. J. Mech. Sci.*, **7** (1965): 621—645
- 6 Holzer A J. *Int. J. Mech. Sci.*, **20** (1978): 553—560
- 7 Kolsky H. *Proc. Phys. Soc., London, B* **62** (1949): 676—700
- 8 白井英治, 白樫高洋, 益子正己. 精密机械. **37**, 4 (1971)
- 9 Stevenson M G. 3rd North American Metal Working Research Conference, Pittsburgh (May, 1975)
- 10 Hauser F E. *Exper. Mech.*, **6** (1966): 395—402
- 11 赵西寰. 太原工学院学报, **3** (1981): 102—113
- 12 白井英治, 白樫高洋. 切削力学——从“描述”到“预测”的理论. 西北工业大学 (1983)
- 13 Stevenson M G, Aust F I E, Cleland D. L. High strain rate tests on two steels using an improved torsional Hopkinson bar apparatus, *Mechanical Engineering Transactions, The Institution of Engineers, Australia* (1981)
- 14 Lewis J L, Campbell J D. *Exper. Mech.*, **12** (1972): 520—524
- 15 Campbell J D. *Mater. Sci. and Eng.*, **12** (1973): 3—21
- 16 Woodward R L, Brown R H. *Proc. Institution of Mech. Eng.*, **189** (1975): 107—115
- 17 Hogatt C R, Recht R F. 2nd Int. Conf. Center for High Energy Forming (June, 1969): 23—27
- 18 Niordson F I. *Exper. Mech.*, **5** (1965): 29—32
- 19 Abou-Sayed A S, Clifton R J, Hermann L. *Exper. Mech.*, **16** (1976): 127—132
- 20 Clifton R J. Mechanical Properties at High Rates of Strain. *Inst. Phys. Conf. Ser.* **47** (1979): 174—186
- 21 Clifton R J. *Trans. ASME (E)*, **50** (1983): 941—952
- 22 Kececigil D. *Trans. ASME (B)*, **80** (1958): 158—165
- 23 Finnie I, Wclak J. *Trans. ASME (B)*, **85** (1963): 351—356
- 24 Stevenson M G, Oxley P L B. *Proc. Institution of Mech. Eng.*, **185** (1970—1971): 741—754
- 25 Wright P K, Robinson J L. *Metals Technology*, **394** (1977): 240—248
- 26 Holzer A J, Wright P K. *Mater. Sci. and Eng.*, **51** (1981): 81—92

## TESTING METHODS OF DYNAMIC PLASTICITY

Wang Min-jie

(Dalian Institute of Technology)

**Abstract** The testing methods in dynamic plasticity are reviewed. The principles, the practical uses, merits and shortcomings of various testing methods are discussed.

**Keywords** *dynamic plasticity, testing method, strain, strain rate*

(上接第85页)

种事实的结果。对于富有创新精神的流体物理学基础研究来说，它们并不表示对自由选题研究的支持有高的水平。我们认为，这种局面是一种科学上和技术上的错误，会带来潜在的严重经济后果。

张德华译自: *Physics Through the 1990s, Plasmas and Fluids*. National Academy Press, Washington, D. C. (1986): 36—48.

(董务民校)