动态试验技术和材料性能述评

U.S.Lindholm

提要 本文对材料非弹性变形性能描述的最新进展作了评述。在对描述应变率影响所依据的理论和实验基础的发展作了一般的讨论之后，介绍了一些具体例子，以说明动态加载下的材料性能。选用这些例子，是为了论证应变率对屈服、非弹性流动，以及在脆性材料和韧性材料中对断裂的影响。

一、引 言

在实际应用中，要作到最恰当地利用材料，就需要对材料的必不可少的力学特性和物理特性有个足够的描述和了解。人们发现，对于经受非弹性变形的大多数材料来说，变形过程的时间尺度对于作用力和变形之间的关系，有某些重要的影响。因此，正如对于长期承载的材料或结构来说，蠕变是确定力学性能的一个重要内容那样，高应变率试验是与短时间瞬间加载相关联的。通常，当我们谈到高应变率时，变形是在秒量级或小于秒量级的时间内完成的。在某些激波实验中，物理量测作到具有毫微秒量级的时间分辨力。所以，我们所讨论的主题，可能包含许多有关时间尺度数量级的问题。

在这篇引论性的文章中，将试图对动态材料试验中所涉及的一些重要方面进行述评。由于至少在最近二十年来，这个课题已成为人们非常关注的问题之一，所以本述评决不会是包罗无遗的。最近，Lindholm(1971)着重在试验技术方面，Campbell(1973)着重于金属动态塑性性能方面，已作了更广泛的述评。读者还可以参考以往发表过的有关这类主题的学术会议文集：Shewmon and Zackay (1961)，Huffington (1965)，Lindholm(1968)，Rosenfield et al (1968)，以及Rohde et al(1973)。本文将对描述材料动态应变率与非弹性变形间的依赖关系的实验基础和理论基础，以及现有的实验技术，进行评述。而且将举出材料性能的一些实例来说明具体的应变率效应。选用这些例子，是为了强调现时的发展，以及指出在哪些方面需要做更进一步的工作。重点是晶状金属和非金属材料，它们不同于聚合物材料或属于粘弹性一类的其他材料。

二、非弹性材料的力学响应描述

2.1.唯象性能

我们的主要目的，是描述变形率对在外力作用下的材料的增量响应有什么影响。这种响应的最一般的表示法，是应力-应变曲线。当应变率或温度允许有变化时，不存在单值的应力-应变曲线，而是存在一个应力-应变空间中的区域，它可以根据加载历史和温度来得到。图1是这种情况的示意图。要考虑多轴加载，就要使用等效应力和等效应变。这里，等效应力和等效应变可以定义成标量不变量的一些适当的函数。各条应力-应变曲线，代表着在一组常温和应变率下进行的试验，以参数T^*为标志。例如，T^*可以根据通常的热激活方程定义为$T^* = T\ln(A/\dot{\epsilon}_{eff})$，它类似于Zener-Holloman参数。此应力-应变面所及的范围，在左边，被温度为绝对零度时或非常高的应变率时所得到的极限曲线所限制，即$T^* \to 0$。在右边，则被试件的破坏所限制。所谓破坏，是指或者是

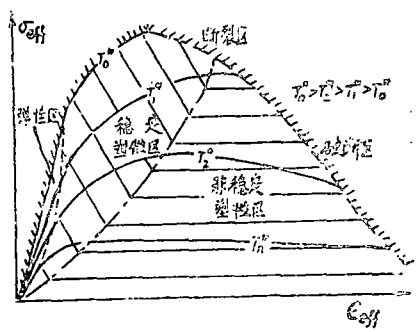

图1 金属应力-应变性能示意图

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

非弹性应变很小时的断裂，或者是在完全破坏（试件裂开）前的大塑性变形时的破断。

中间的区域被分成三个区：弹性区、稳定塑性区和非稳定塑性区。弹性区和稳定塑性区之间的界限，由屈服面来确定。稳定和非稳定塑性流动之间的界限，由工程上的应力-应变曲线中相应的最大值来确定。这个点是试件均匀变形的极限，由局部的塑性流动和颈缩来表征。稳定和非稳定塑性流动之间的界限，在某些T*值时，将和断裂界限相交。因此，依赖于不同的T*值，最终的强度或者可以对应于断裂应力，或者可以对应于应力-应变曲线中的最大值。相反地，随着应变率或温度的变化，可能出现材料由韧性向脆性的转变。

因此，对材料的性能进行完整的描述，需要同时确定变形规律和极限条件。例如，Hooke定律是弹性范围中的变形规律，而Mises屈服准则可以确定弹性响应的极限条件。下面几节，评述关于为了确定非弹性变形定律，以及弹性、稳定塑性和破坏的极限条件，所作的理论和实验工作。

2.2.塑性变形理论

把经典塑性力学问题推广到时间相关流动问题，一般是从屈服函数的概念作为基础。这个屈服函数可以假定成如下的形式：

$$F = [(F_2'^{1/2})/C] - 1 \qquad (1)$$

F_2'是应力偏量的第二不变量，C是剪切条件下的“静态”屈服应力。于是，认为塑性应变率$\dot{\epsilon}^p_{ij}$与F的数值成比例。这里，对F的正值而言，F是瞬时应力状态的标量测量值〔方程（1）中的$(F_2')^{1/2}$〕与屈服面〔$(F_2')^{1/2}=C$〕之间的差值的一个度量。这个应力差，常被称为“过应力”（overstress）。Bingham（1922）把纯剪的关系公式化为

$$\left.\begin{array}{l}\dot{\epsilon}_{12}=\lambda_1\dot{\sigma}_{12}+\gamma_1\langle F\rangle(\sigma_{12}/|\sigma_{12}|)\\ \text{对于}|\sigma_{12}|\leqslant C,\ \langle F\rangle=0\\ \text{对于}|\sigma_{12}|>C,\ \langle F\rangle=F\end{array}\right\}\quad(2)$$

此后，Hohenemser and Prager（1932）把它推广，用于广义应力状态：

$$\left.\begin{array}{l}\dot{\epsilon}'_{ij}=\lambda_2\dot{\sigma}'_{ij}+\gamma_2\langle F\rangle[\sigma'_{ij}/(F_2')^{1/2}]\\ \text{对于}(F_2')^{1/2}\leqslant C,\ \langle F\rangle=0\\ \text{对于}(F_2')^{1/2}>C,\ \langle F\rangle=F\end{array}\right\}\quad(3)$$

Malvern（1951）提出了在一维粘塑性波传播问题的更为一般的公式中的函数相依关系：

$$\left.\begin{array}{l}\dot{\epsilon}_{11}=\lambda_3\dot{\sigma}_{11}+\Psi(\sigma_{11},\epsilon_{11})\\ \text{对于}\sigma_{11}\leqslant f(\epsilon_{11}),\ \Psi(\sigma_{11},\epsilon_{11})=0\\ \text{对于}\sigma_{11}>f(\epsilon_{11}),\ \Psi(\sigma_{11},\epsilon_{11})\neq 0\end{array}\right\}\quad(4)$$

然而，Malvern保留了依赖于“过应力”的关系，在该关系中，只是当应力比“静态”应力-应变曲线$\sigma_{11}=f(\epsilon_{11})$的值大时，应变率的塑性分量才是有限大的。Perzyna（1963）把Malvern公式推广到广义应力状态，如下：

$$\left.\begin{array}{l}\dot{\epsilon}'_{ij}=\lambda_4\dot{\sigma}'_{ij}+\gamma_4\Phi(F)[\sigma'_{ij}/(F'_2)^{1/2}]\\ \text{对于}(F_2')^{1/2}\leqslant C,\ \Phi(F)=0\\ \text{对于}(F_2')^{1/2}>C,\ \Phi(F)\neq 0\end{array}\right\}\quad(5)$$

上面所有的λ和γ，都是适当的弹性和粘性材料常数，ϵ'_{ij}和σ'_{ij}是偏应变张量和偏应力张量。

塑性动力学中的这些连续公式，依赖于塑性流动的宏观测量，给出任意常数或未定函数的形式。与此同时，通过所掌握的微观机理（主要是由位错引起的滑动）去描述宏观流动方面，曾作了同等的努力。在这方面已有大量文献，一般归属于位错动力学的题目之下。为了以最简单的形式介绍这个方法，考虑Johnston and Gilman（1959）的简单应变率方程

$$\dot{\epsilon}=(\dot{\sigma}/M)+\phi b\rho v \qquad (6)$$

这里，M是弹性模量，ϕ是取向因子，b是Burger矢量，ρ是可动位错密度，v是位错的平均速度。塑性应变率取决于可动位错密度与位错速度的乘积。靠假定ρ和v依赖于变形和应力的各种函数关系。就能得到对材料宏观行为的定性和或常常是定量的描述。例如，Johnston（1962）和Hahn（1962）都是通过适当选择位错增殖函数$\rho=\rho(\epsilon)$，去模拟屈服。通过位错速度依赖于应力的关系$v=v(\sigma)$，引进了应变率的影响。一些通常使用的函数是

$$v=\alpha\sigma^n \qquad (7)$$

$$v=\alpha\exp(-D/\sigma) \qquad (8)$$

$$v=\alpha\exp[-\Delta u(\sigma)/(kT)] \qquad (9)$$

$$v=\alpha\sigma-\sigma_B \qquad (10)$$

方程（7）是基于使用蚀痕技术直接测量位错速度得到的经验公式。方程（8）是基于Gilman（1965）提出的位错、点缺陷交互作用模型。方程（9）是位错超过短距离位垒的热激活的广义关系，其中$\Delta u(\sigma)$是与应力相关的激活能，T是绝对温度。在位错速度很高时，以若干不同的实验量测为依据，认为线性粘性关系，即方程（10），是起支配作用的，并且假定了如同声子粘性和声子散射那样的位错阻尼机制。

位错动力学方法应用起来有困难，因为在瞬态条

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

件下，定量地测量有关的参数（位错密度和位错速度）是不容易的。还由于它们在方程（6）中是以一个乘积出现，所以它们各自对总的塑性应变率所起的作用就难以确定。尽管如此，人们用这个方法去了解金属塑性，已经得到不可估量的增进。在最近的努力中，尤其值得注意的是S.R.Bodner（Bodner 1968, Bodner and Partom 1972），已试图把位错动力学的结果结合到连续统塑性理论的框架中去。作为方程（7）—（10）的推广，Bodner提出塑性变形率偏量的第二不变量是相应的应力不变量的函数，即

$$D_2^p = f(F_2') \tag{11}$$

因而，他提出了流动方程的增量形式。这个方法和经典塑性方法之间的重要差别是，不存在一个明显的屈服函数。根据位错动力学，在任何有限应力和有限温度的情况下，都可能出现塑性流动。这就没有必要把应力空间划分为弹性区和塑性区，而这种划分总是伴随着在计算程序中需随时记住的一些问题。屈服现象仍可通过适当选择表示位错增殖或位错湮灭的函数，适当地予以描述。这种方法也无需依靠"静态"应力-应变曲线或屈服面；而静态应力-应变曲线或屈服面，除了作为一个参考之外，并没有什么真正的物理意义。"过应力假设"也是不必要的。

2.3.极限条件

与变形定律相配合的是极限条件，它构成所描述性能的边界。这些极限条件也受应变率和温度的影响，如图1所示。Paul（1968）曾作了关于宏观屈服和断裂准则的理论基础和实验基础两方面的全面评述。传统的屈服条件是以应力（例如Tresca）、应变（例如St.Venant）或应变能（例如von Mises）的极限状态为依据的。破坏准则也类似地予以表达，但最一般的是包含着依赖于静水压（即应力平均分量），以及依赖于应力偏量（即剪应力分量）的函数关系（例如Coulomb-Mohr）。由于这个原因，破坏面一般不是单值的（如图1所示），而将有不同于流动性能的对ϵ_{eff}的依赖关系。

仅仅在最近，才开展了关于应变率对多轴屈服和破坏准则的影响的实验研究。一些结果将在下节介绍。

在单轴拉伸试验中，稳定塑性流动的极限条件是由流动规律决定的，并且与稳定塑性区中的应变-硬化曲线有关。如果真实的流动应力$\bar{\sigma}$，在拉伸中是真实应变$\bar{\epsilon}$、应变率$\dot{\bar{\epsilon}}$和温度T的单值函数，那么，稳定性边界就由下式给出：

$$\frac{\partial\bar{\sigma}}{\partial\bar{\epsilon}} + \frac{\partial\bar{\sigma}}{\partial\dot{\bar{\epsilon}}}\frac{d\dot{\bar{\epsilon}}}{d\bar{\epsilon}} + \frac{\partial\bar{\sigma}}{\partial T}\frac{dT}{d\bar{\epsilon}} = \bar{\sigma}(\dot{\bar{\epsilon}}, \bar{\epsilon}, T) \tag{12}$$

Klepaczko（1968）和Campbell（1967）研究过材料在拉伸时应变率对稳定性极限的影响。对广义应力状态来说，稳定性边界在静态和动态金属成型加工中都是重要的。笔者不了解关于这问题的概括的分析。

2.4.试验方法的发展

2.4.1.准平衡态，波的传播实验 人们对金属在塑性状态下的应变率效应最初感到兴趣，是由第二次世界大战期间，在塑性波传播方面的理论工作引起的。当时，Malvern，Taylor和Rakhmatulin在推广von Karman较早期的应变率无关理论时，引进了粘性效应。最初，研究者们常常依靠对瞬态波形和质点速度进行测量，或对大幅度应力波传播过程中的应变进行测量，来直接确定金属中应变率效应的大小。这种方法的一个主要实例，是Bell（1968）所作的广泛的工作。在这方法中，瞬时应力不是直接测量得到的，而是根据满足实验的初始值和边界值条件的波传播问题的解析解推导出来的。伴随这个过程而来的困难是，波的形状对于在备选的一些函数形式中，究竟用哪一种作为材料本构方程的形式，并不敏感。图2和图3说明了这个问题。图2表示被阶跃函数那样的应力加载的一根杆，其应变率相关的解和应变率无关的解之间所作的比较。波形的主要区别，在于应变率相关的解是以更加渐变的方式趋于平衡态的最大应变值。在表明Bell（1967）的实验结果的图3中，可以看到实验所得的同样的定性性能。理论曲线是应变率无关的解。在图3中实验结果和理论结果之间的小小

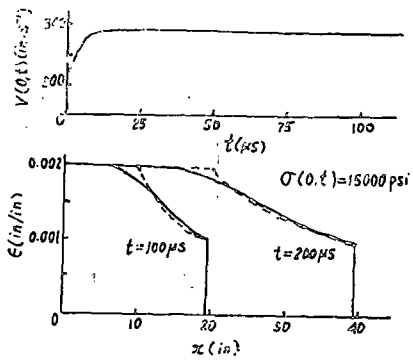

图2 塑性波传播与应变率相关的解（实线）和与应变率无关的解（虚线）之间的比较

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

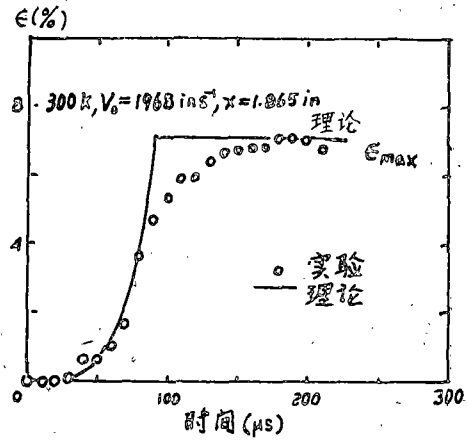

图 8　塑性波在铝中传播时实验结果和与应变率无关理论所得结果的比较

不符，可能是由于有限应变率的影响，是由于传播着的波的二维弥散，或由于最初撞击的非平面性所引起的。正如Ripperger and Watson (1968) 所论证过的那样，借助于测量波形的方法去辨别与应变率相关的本构关系的各种形式，甚至是更困难的。

代替波传播实验的是，利用一个试件，它的塑性体积变形很小，在这个体积中，应力是均匀的，或者是在测量的时间间隔内，应力处于准平衡态。可以测出作用在这体积的边界上的应力，并且可以直接用变形来校正。变形率增加时，塑性体积或试件尺寸必然减小。Kolsky (1949) 所采用的Hopkinson压力杆技术，就是这种方法的一个实例。

2.4.2.定常-非定常流动　等应变率试验和变应变率试验，都是用来描写率型材料 (Rate-dependent materials) 的特征的。可惜的是，象Klepaczko (1967)，Franz and Duffy (1972) 以及其他许多人所证明过的那样，塑性响应可能受应变率历史的影响。例如，在应变率突然阶跃地增加之后，应变硬化曲线并不与相应于较高应变率时的应变硬化曲线相平行，但是，在继续应变时，会逐渐趋近于后者。要把这种效应纳入本构方程中，尚需再作相当大的努力。这不仅包括应变加速或减速的情况，而且还包括不等温应变和非比例应变（在增量应变矢量的方向改变）的情况。不同的应变率试验，通常用来测定材料的参数。在定常（常应变率）流动期间所测定的这些参数之间的关系，需要进一步予以阐明。

2.4.3.应力状态　极大多数高应变率试验是在单轴应力条件下完成的，通常是简单的拉压或剪切。目前，动态试验是在薄壁管试件上施加复合载荷，以产生可以控制的双轴应力状态。载荷包括轴向应力，以及由径向压力引起的扭转应力和周向应力的组合。由轴向加载和径向围压相组合，在实心的棱柱试件上产生三轴载荷。

2.5.现代实验技术

2.5.1.低应变率 ($<10^2 s^{-1}$) 大多数适用于低应变率和中等应变率的万能试验装置，是一种用液压传动机构产生所需载荷的设备。液压传动机构的主要优点是，它构成一个刚性系统，该系统在中等速度下，可以作到直接的闭回路控制。Lindholm et al (1971 b) 介绍了一种高速液压机，该机可以以轴向的和扭转的联合加载方式工作。这台试验机有10000 lb轴向加载能力和3100in·lb扭矩。双轴传动机构单独装在一个结实的壳体里，以达到试验机有最大的刚度。液压流由两个平行的阀门系统控制。低速时，伺服阀用于控制试验系统的整个闭回路。由载荷、应变或十字头位移传感器得到反馈控制信号。轴向拉伸和扭转的闭回路频率响应是20Hz。在小试件上受到控制的常应变率试验，可能达到约$1s^{-1}$应变率。另一个流动控制系统是一个螺旋触发装置，也即快泄阀，它把传动机构同一个密封的增压器连接起来。在这个阀控系统中，也可以有一些可以改变孔口的小孔道。这个开回路流动系统，供给十字头达$30in \cdot s^{-1}$和$100rad \cdot s^{-1}$的速度。使用这种设备，曾用高强度钢做成的短的标准长度的试件完成了应变率达$100s^{-1}$的扭转试验。

Randall and Campbell (1972)研制了一台类似的拉伸-扭转液压启动机，最大应变率可以达到同样数量级。这种试验机在试件的每一端装有独立的传动机构，但没有装伺服控制。气动的开回路机也曾由Lindholm and Yeakley (1967) 以及Maiden and Green (1966) 描述过。

贮存的机械能也可以用于高变形率的研究。最普通的是落锤和飞轮。由Hockett (1959)描述过的凸轮塑性仪，提供了也许是机械驱动试验设备的最好控制方式。

对于这个应变率范围的试验机来说，人们主要关心的是，在机械系统和液压系统中提供足够的刚度以避免共振。Lindholm (1971) 对试验技术和操作技术已作了更详细的讨论。

2.5.2.高应变率 ($>10^2 s^{-1}$)　迄今为止，在所讨论的设备类型中，$100s^{-1}$以上的应变率导致越来越难于避免的共振和惯性效应。为了保持在变形试件中应力平衡的假定，试件必须很小。对试件的固定，必须作到能够迅速加速，并且其几何形状必须是能把波

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

传播的效应控制住，或者能计算出来。Kolsky(1949)已经巧妙地解决了这个问题。他用一根长弹性杆，借助于一个应力脉冲传过该系统的方法去加载短的压缩试件。这种技术在多年使用中曾有许多改进，并且已为许多文献所证明。通常称此为Hopkinson分段压杆技术。最初把它设计出来用于压缩试验，后来被Harding et al (1960)，Hauser (1966)以及Lindholm and Yeakley (1968)改进，用于拉伸试验；被Duffy et al (1971)以及Lewis and Campbell (1972)用于扭转剪切；被Hauser(1966)用于直剪；被Lewis and Goldsmith (1973)用于同时发生扭转和压缩的试验。Hopkinson杆技术曾被Chalupnik and Ripperger (1966)以及Lindholm et al (1974)改进，用于动态轴向压缩和静态径向围压联合作用的情况。这些研究者们也研究了三向等压对材料动态强度的影响。

Hopkinson杆试验的适用范围，看来是在应变率为10^2—$10^5 s^{-1}$的范围内，虽然在超过$10^4 s^{-1}$时，就有必要对这种方法中所特有的假定进行严格的检验。试件中塑性波的传播以及压杆中弹性波的弥散所引起的应力均匀化，不可能达到为产生这样高应变率所必需具有的质点速度。最近，Bertholf (1974)作了该技术的一个二维数值分析，它相当精确地说明了波在杆中和试件中传播的详细情况。

其他有关均匀受力试件的高应变率试验技术，没有得到同样的发展。仅有的已被非常注意的公认技术，是动态膨胀环形试件。在这种技术中，一个自由的薄壁圆筒环被径向脉冲加载而动态膨胀。Hoggatt et al (1967)提出了由炸药包爆炸产生脉冲的方法。Niordsen (1965)用电容器组突然放电的电磁方法产生力。这两种情况所产生的周向拉伸应力，使圆环迅速减速。因此，初始高应变率非常迅速地下降。对缸内的应力和圆环的应变进行连续测量，并不象在Hopkinson杆实验中那么容易做到。

其他的动态过程，例如梁或板的弯曲，高速切削或挤压，都能使材料受到高应变率。然而，应力状态是不均匀的，这些过程不宜于对应力和变形直接地连续测量。因此，它们对直接测定材料特性不那么有用。不过，这些过程可以使人们看到应变率效应的直接例证。

三、应变率效应的实例

应变率对金属性能产生影响的数据资料，已由Lindholm and Bessey (1969)，Green et al (1969)，Elieche (1972)以及Campbell(1973)作了简要的汇编。因此，本文将着重谈一些新近的结果，以及过去没被重视的一些应变率现象。值得注意的有：多轴应力试验，很高的应变率效应并转变为线性粘性行为，以及应变率对脆性和韧性破坏的影响（包括绝热剪切）。

3.1.屈服

软钢的屈服，已被多方面地研究过了。这里，我们将只关心双轴加载与应变率二者共同对钢由弹性转变为稳定塑性流动的影响。Lindholm (1965)首先提供了软钢在屈服时的双轴拉伸-扭转试验资料。Randall and Campbell (1972)最近就三种不同的应变率取得了示于图4的屈服面曲线。这两个研究工作都使用了开回路装置，其应力和应变轨迹是无控制的。在这两种情况下，在屈服阶段，应力轨迹朝拉伸轴的方向弯曲，与屈服面大致平行。这可以在图5中看到。这些双轴的记录，是在作者的实验室里的一

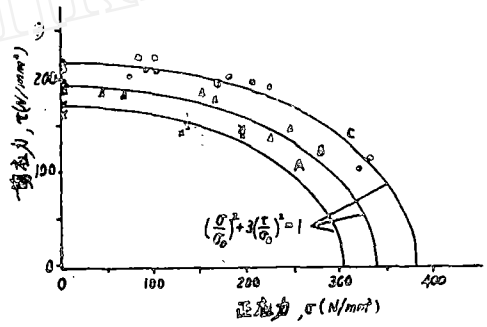

图4　关于EN2E钢，应变率对较低屈服应力的影响（Randall and Campbell, 1972）

曲线A：$\dot{\bar{\epsilon}}=1\ s^{-1}$，$\sigma_0=304N/mm^2$

曲线B：$\dot{\bar{\epsilon}}=6\ s^{-1}$，$\sigma_0=341N/mm^2$

曲线C：$\dot{\bar{\epsilon}}=35s^{-1}$，$\sigma_0=387N/mm^2$

台伺服-控制机上得到的。使用了常应变率和常应力率两种控制方式。图中也显示了应力和应变历史结合在一起的示波记录。在应变控制情况下，正如在这种条件下等效应力-等效应变曲线所表明的那样，出现一个大的屈服降落。应力松弛只在扭转轴上出现；而法向拉伸应力却连续增加。这就产生了前面所说的逐渐增加的应力轨迹。Randall and Campbell把这种现象归因为在管状几何结构中的Luder带传播。在应力控制情况下，两个轴上的应力都在连续增长，并

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

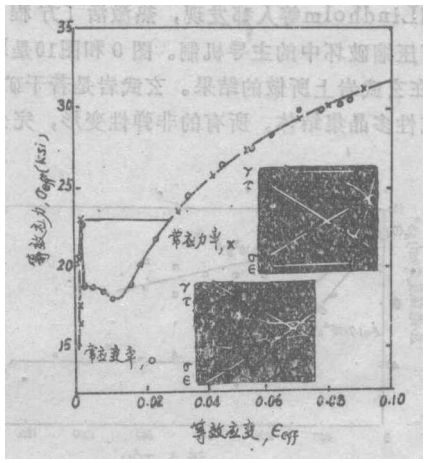

图 5　在控制应变率和应力率的情况下软钢的双轴屈服

且在初始（上方的）屈服之后，接着是一个非常迅速的应变加速。等效应力-等效应变曲线由上屈服点直接跳到应变硬化曲线上。

这些结果说明，在非稳定屈服材料中，运动约束和动力约束都会大大影响屈服及初始流动性能。

3.2.塑性流动

人们对铝合金的动态特性已经进行过极广泛的研究。图 6 概括了许多铝合金的应变率影响流动应力的资料。应变率范围为10^{-3}—$10^{3}s^{-1}$时，得到了每一种合金的斜率 $d\sigma/d\ln\dot{\epsilon}$ 值（σ_0是$\dot{\epsilon}=1\ s^{-1}$时的流动应力）。这个比率的灵敏度随着合金平均强度的增高而减小。然而，有趣的是，由$d\sigma/d\ln\dot{\epsilon}$量度的绝对应变率效应，沿着实线是一个常数。既然如此，所有合金受应变率控制的机理简直几乎是一样的。

有关铝在较高应变率（$>10^{3}s^{-1}$）时的数据（例

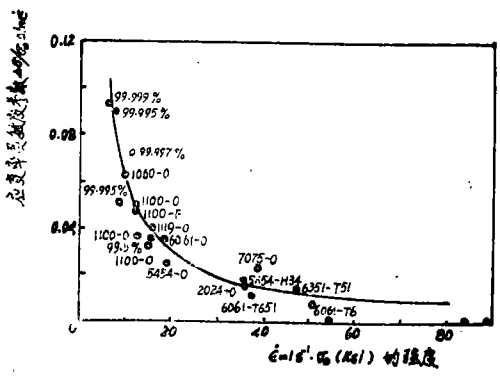

图 6　大量铝合金的应变率灵敏度

如Hauser et al, 1961），常常表现出应变率灵敏度迅速增高。用其他金属作试验，表明在这些高应变率时，应变率灵敏度也有类似的提高，多数研究者认为这种应变率灵敏度的提高，是由于由较低速度的机制（通常是热激活）向伴随着很高位错速度的线性粘性机制转化所引起的。在多晶金属中，这种粘性行为只在应力足够高时才出现，致使位错穿透那些在低应力时阻碍它们运动的位垒。所收集的铜和铁的数据，将用来研究高应变率时的这种转化。

图 7 介绍了铜的数据，并注明了数据的来源。所有的研究者在高应变率实验中都使用了 Hopkinson 分段压杆。应变率在$10^{3}s^{-1}$以下的所有数据，具有差不多的斜率。Davidson and Lindholm (1974) 使用小型压缩试件和超高强度压杆，在$\dot{\epsilon}=10^{5}s^{-1}$情况下做实验，发现应变率的影响没有变化。他们所用试件的长径比是0.5，并且对所有的应变率来说，都保持为常数。Edington (1969) 也在压缩情况下作了试验，不过他把低应变率时所用的长径比为 1 的试件，改为长径比为0.16，从而得到了高应变率。Dowling et al (1970) 使用了一种冲孔剪切试验。这些研究者都发现，在$\dot{\epsilon}=10^{3}s^{-1}$时，应力迅速增大。关于实验数据的某些不同趋向，也许可以用试样的几何形状来解释。

铁和钢的数据类似，如图 8 所示。Rosenfield and Hahn (1966) 收集了普通碳钢的较低屈服应力

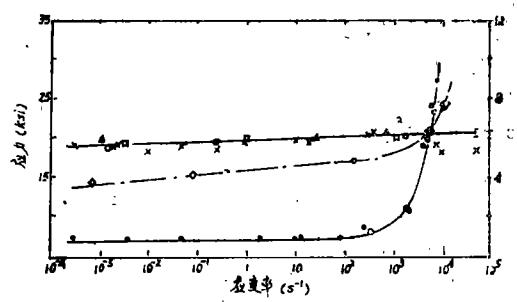

图 7　应变率对铜的流动应力的影响

× Davidson and Lindholm (1974) 99.999%Cu，$\epsilon=10\%$

● Edington (1969)，99.999%Cu晶体，$\epsilon=0.1\%$

◇ Dowling et al (1970)，99.9⁺%Cu，$\gamma=10\%$

△ Alder and Phillips，□ GM，○ Lindholm，都是用OFHC Cu，$\epsilon=6\%$

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

的数据。这些数据落在图8的阴影带中，在 $\dot{\epsilon}=10^3 s^{-1}$ 时，应力急剧地增大。对于同一种材料说来，应变率较低时的应变率灵敏度与其他应变率时的灵敏度差不多，图中是铁的数据。铁的数据是用来与Rhodemar和Lindholm等人都发现，热激活〔方程(9)〕是岩石压缩破坏中的主导机制。图9和图10是Lindholm在玄武岩上所做的结果。玄武岩是若干矿物质的硬脆性多晶集结体。所有的非弹性变形，完全是由

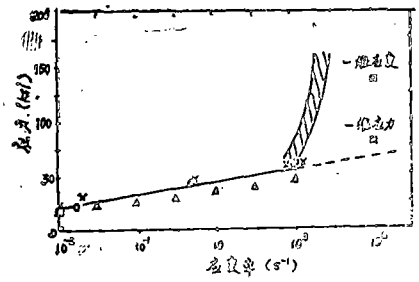

图8　应变率对铁的屈服应力或流动应力的影响

× GM Armco, $\epsilon=2\%$

○ GM Ferrovac, $\epsilon=2\%$

△ Davidson et al (1966) 99.98% $\epsilon=2\%$

□ Rohde Ferrovac, $\epsilon=\epsilon_y$

阴影区　Rosenfield and Hahn (1966)

(1969) 的冲击波实验数据相比较的。在应变率估计为$10^6 s^{-1}$时，在单轴应变情况下，冲击波实验引起屈服。在132ksi时，产生单轴应变屈服。当把这个值变换成等效应力时，其值为81ksi。图8给出了这些值。贯申铁在低应变率时的数据的是一条直线，单轴应力的值就在这条直线延伸线的稍上方。此外，对高于$10^3 s^{-1}$应变率时的材料性能，数据似乎还得不出什么结论。

有必要更努力于确定应变率为$10^3 s^{-1}$以上时的塑性流动。在这个范围内，各种实验技术常常处于它们最大的能力限度，因而必须作严格的检验。对于位错运动穿透有高度缺陷的多晶试件来说，粘性阻尼可能是主导迟滞机制的假定，也还需要严格的验证。对两个钉住的点之间位错回路的高频振荡进行直接测量，或者对无缺陷相互作用的高纯度单晶中的自由位错运动进行直接测量，都支持了这个机制。

3.3.脆性断裂

最近的工作表明，在岩石的压缩强度中，应变率可能是一个重要因素。Kumar (1968)，Green and Perkins (1968)以及Lindholm et al(1974)研究了压力、应变率及温度对岩石强度的影响。Ku-

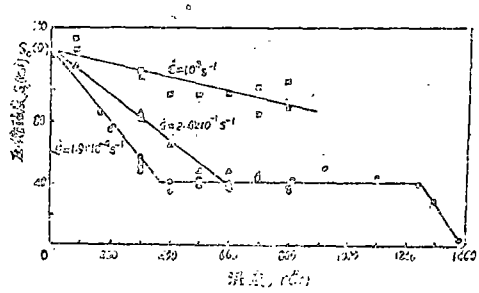

图9　温度和应变率对不受围压的玄武岩的压缩强度的影响（Lindholm et al, 1974）

微观裂纹核和它的扩展所引起的。压缩破坏是这些裂纹联合成一种不稳定破坏的结果。如图所示，极限压缩强度强烈地依赖于应变率、温度和围压。图9表明，有一个开始破坏所需要的门槛应力，在软化点1200°K以下时，它和温度无关。另外，数据由下列的断裂准则联系起来：

$$\frac{\sigma_1}{S_C(0)}+\frac{S_C(0)-S_{BC}(0)}{S_C(0)S_{BC}(0)}\sigma_2-\frac{\sigma_3}{S_T(0)}=1-\beta T\ (A-\ln\dot{\epsilon}_0) \qquad (13)$$

这里，S (0) 是T = 0 时压缩、拉伸和双轴压缩的强度。A和β是常数，$\dot{\epsilon}_0$是应变率的标量尺度，σ_i是主

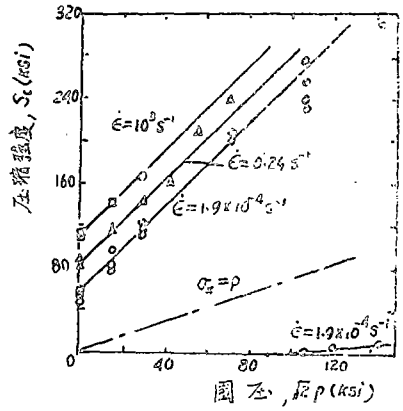

图10　应变率和围压对玄武岩压缩强度的影响（Lindholm et al, 1974）

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

应力。由于方程（13）中应变率和温度只在与应力无关的项中出现，所以随着这些变量的改变而出现的就仅仅是破坏面各向同性的扩展或收缩。可以看到，应变率在钢的屈服强度方面，也有着各向同性的影响（见图4）。

金属在高应变率时会产生脆性破坏。图11表示钼在拉伸应变率增加的过程中，由韧性材料转化为脆性材料。它的延伸率在静拉伸时是40%，在应变率是$2s^{-1}$时减小到零。随着温度的降低，出现类似的转化，这是众所熟知的。

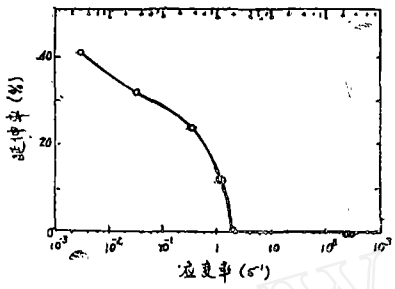

图11　钼的拉伸破坏延伸率与应变率的关系

3.4.韧性破坏

图6中提到过的许多铝合金在应变率直到10^3s^{-1}时的韧性变化情况，示于图12。对于更多的韧性合金来说，在高应变率情况下，应变率的影响，由可以忽略而增加到中等的程度。

应变率对钛（6Al-4V）的双轴韧性的影响示于图13。这是由薄壁管状试件在轴向载荷和内压下得到的结果。在这种合金中，应变率的增高使韧性减小。应变（应力）率对达到破坏的应变值也有明显的影响。在应力比大约为2：1时，出现韧性的最小

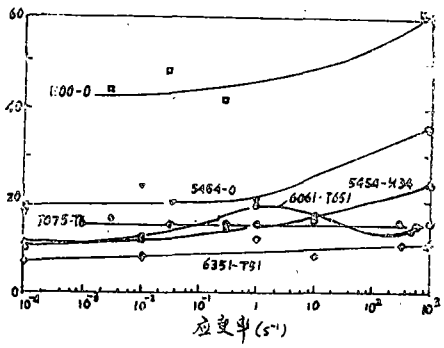

图12　应变率对若干铝合金的韧性的影响

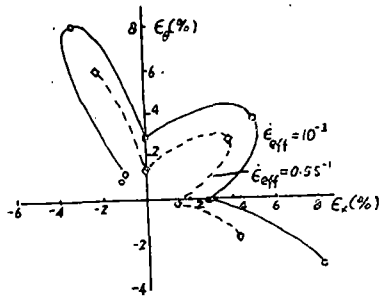

图13　6Al-4V钛在两种应变率下试验的二维断裂应变（Lindholm and Yeakley，1971）

值。数据在x和θ方向的对称性使我们可以认为，对于破坏应变轨线的形状来说，管子的几何形状不是主导因素。

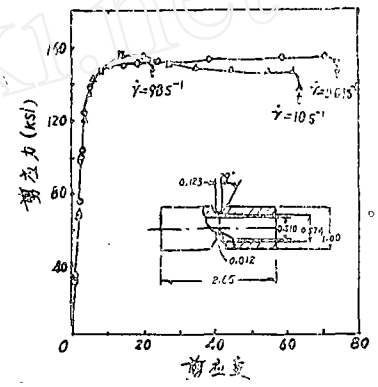

图14　应变率对高强度钢扭转试验的影响

Orava（1967）提供了有关动态韧性方面的补充数据资料。对于金属成型加工的应用来说，必需更多地了解应变率和双轴效应对韧性的影响。

3.5.绝热剪切

如果在高应变率时，我们假定全部塑性功都转换成热，并且变形过程是绝热的，则温度的升高将是

$$\Delta T=\frac{1}{\gamma c}\int_0^{\epsilon^p_{max}}\sigma d\epsilon^p$$

这里，γ和c是密度和比热。在多数试验应用中，这个温升很小而被忽略。在很多实际应用中出现大剪切变形，绝热效应会导致剪切不稳定性。这些情况对金属切割、弹道侵彻以及破碎，都具有重要意义。动态扭转试验被认为是适合于这个问题的研究的。当应力高、变形大时，方程（14）中的积分起很大的作用。在拉伸或压缩时，大变形并不那么容易实现。Bitans

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

and Whitton (1970-71) 以及Culver (1973)把扭转试验用于研究绝热效应。笔者使用2.4节中介绍的液压装置，在扭转剪切应变率为10^{-2}—$10^{2}s^{-1}$的情况下，作了高强度钢（AMS6418)的试验。图14和15证明了绝热剪切的产生。图14给出了试件的几何形状和典型应力-应变曲线（应变率由十字头的旋转产生，并包括了试验机的刚度影响）。在$10^{-2}s^{-1}$时出

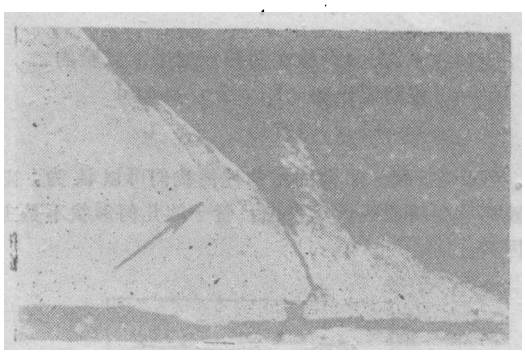

图15 AMS6418钢高速扭转试验时形成的绝热剪切带

现正的应变硬化，直到应变为73%时破坏。在$10s^{-1}$时，在大应变以及韧性降低的情况下，绝热的影响开始产生软化。在$98s^{-1}$时，由于剪切的不稳定性，应变集中是那样剧烈，以致在材料中形成一个狭窄的形态转化带。这导致材料在应变很小时就破坏了。因为屈服应力保持为常数，所以在最高应变率时，总塑性功大大减小了。能量必然迅速集中到这些狭窄带中，从而引起所观察到的相变所必须的温升。

用动态扭转试验做进一步的工作，在输入能量可控条件下，应该能够导致对成核机理及剪切不稳定性的传播有更多的了解。

四、结　论

目前使用的测定金属及其他材料的应变率影响的实验技术，在应变率$10^{3}s^{-1}$范围内是很有把握的。这包括各种变形方式，其中包括双轴和三轴应力状态。目前，关于这些应变率所作的实验方面的努力很可能超过了理论方面的努力。不论是微观结构的，还是连续统塑性的方法，对诸如：应变率历史的影响，在组合应力作用时极端偏离比例加载的途径，或是象绝热剪切那样一些热-机械耦合问题，都还没有能够完全掌握。当试验是多轴应力状态，并且温度和应变是变化着的时候，自变量的数目会很多。在关键性实验的设计中需要理论的指导，以便把变形过程的各种模型区分开来。

应变率超过$10^{3}s^{-1}$时，理论，尤其是微观结构理论，和实验技术，都需要更进一步的发展。现有的实验数据还不足以得出结论。应变率灵敏度的急剧提高的迹象，对于在这些应变率下有可能得到充分定量的预测来说，是重要的。可惜，由于包含了时间尺度，这是一个相当大的实验难题。

参　考　文　献

Bell, J.F. (1967), *Exp.Mech.*, 7, p.8.

—— (1968), The Physics of Large Deformation of Crystalline Solids (New York: Springer-Verlag).

Bertholf, L.D. (1974), *J.Appl.Mech.*, 41, p.137.

Bingham, E.C. (1922), Fluidity and Plasticity (New York: McGraw-Hill).

Bitans, K.and Whitton, P.W. (1970-71), Proc.Inst.Mech.Eng., 185, p.1149.

Bodner, S.R. (1968) Mechanical Behaviour of Materials under Dynamic Loads, ed. U.S.Lindholm (New York: Springer) p.176.

Bodner, S.R.and Partom, Y. (1972), *J. Appl.Mech.*, 39, p.751.

Cambell, J.D. (1967), *J. Mech. Phys. Solids*, 15, p.359.

—— (1973), *Mat. Sci. Eng.*, 12, p.3.

Chalupnik, J.D.and Ripperger, E.A.(1966), *Exp.Mech.*, 6, p.547.

Culver, R.S. (1973), Metallurgical Effects at High Strain Rates (New York: Plenum) p.519.

Davidson, D.L.and Lindholm, U.S. (1974), to be published.

Davidson, D.L., Lindholm, U.S.and Yeakley, L.M. (1966), *Acta Metall.*, 14, p.703.

Dowling, A.R., Harding, J.and Campbell, J.D. (1970), *J.Inst.Metals*, 98, p.215.

Duffy, J., Campbell, J.D.and Hawley.R.H. (1971), *J.Appl.Mech.*, 38, p.83.

Edington, J.W. (1969), *Phil.Mag.*, 17, p.41.

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Eleiche, A.S.M. (1972), AFML-TR-72-125 Wright-Patterson Air Force Base, Ohio: Air Force Materials Laboratory.
Franz, R.A. and Duffy, J. (1972), *J.Appl. Mech.*, 39, p.939.
Gilman, J.J. (1965), *J.Appl.Phys.*, 36, p.3195.
Green, S.J., Maiden, C.J., Babcock, S.G. and Schierloh, F.L. (1969), Battelle Colloquium on Inelastic Behaviour of Solids, p.521.
Green, S.J. and Perkins, R.D. (1968), Proc.10th Symp.on Rock Mechanics (Society of Mining Engineers).
Hahn, G.T. (1962), *Acta Metall.*, 10, p.727.
Harding, J., Wood, E.D. and Campbell, J.D. (1960), *J.Mech.Eng. Sci.*, 2, p.89.
Hauser, F.E. (1966), *Exp.Mech.*, 6, p.395.
Hauser, F.E., Simmons, J.A. and Dorn, J.E. (1961), Response of Metals to High Velocity Deformation, ed.P.G. Shewmon and V.F.Zackay (New York: Interscience), p.93.
Hockett, J.E. (1959), *Am.Soc.Testing Mater.Proc.*, 59, p.1309.
Hoggatt, C.R., Orr, W.R. and Recht, R.F. (1967), 1st Int.Conf.of the Center for High Energy Forming, Estes Park (University of Denver).
Hohenemser, K. and Prager, W. (1932), *Z. Ang.Math.Mech.*, 12, p.216.
Huffington, N.J., Jr. (ed.) (1965), Behaviour of Materials under Dynamic Loading (New York: ASME).
Johnston, W.G. (1962), *J.Appl.Phys.*, 33, p.2716.
Johnston, W.G. and Gilman, J.J. (1959), *J.Appl.Phys.*, 30, p.129.
Klepaczko, J. (1967), *Arch.Mech.Stos.*, 2, p.19.
—— (1968), *Int.J.Mech.Sci.*, 10, p.297.
Kolsky, H. (1949), *Proc.Phys.Soc.*B, 62, p.676.
Kumar, A. (1968), *Geophysics*, 33, p.501.
Lewis, J.L. and Campbell, J.D. (1972), *Exp.Mech.*, 12, p.520.
Lewis, J.L. and Goldsmith, W. (1973), *Rev.Sci.Instrum.*, 44, p.811.
Lindholm, U.S. (1965), Mechanical Behaviour of Materials under Dynamic Loading, ed.N.J.Huffington (New York: ASME), p.42.
Lindholm, U.S. (ed.) (1968), Mechanical Behaviour of Materials under Dynamic Loads (New York: Springer-Verlag).
Lindholm, U.S. (1971), Techniques in Metals Research, ed. Bunshah (New York: Interscience), vol.5, part 1.
Lindholm, U.S. and Bessey, B.R.L. (1969), AFML-TR-119 (Wright-Patterson Air Force Base, Ohio: Air Force Materials Laboratory).
Lindholm, U.S., Bessey, R.L. and Smith, G.V. (1971a), *J.Mater.*, 6, p.119.
Lindholm, U.S. and Yeakley, L.M. (1967), *Exp.Mech.*, 7, p.1.
—— (1968), *Exp.Mech.*, 8, p.1.
—— (1971), AFML-TR-71-37 (Wright-Patterson Air Force Base, Ohio: Air Force Materials Laboratory).
Lindholm, U.S., Yeakley, L.M. and Nagy, A. (1971 b), AFML-TR-71-149 (Wright-Patterson Air Force Base, Ohio: Air Force Materials Laboratory).
—— (1974), *Int.J.Rock Mech.and Mining Sci.*, 11, p.181.
Maiden, C.J. and Green, S.J. (1966), *J. Appl.Mech.*, 33, p.496.
Malvern, L.E. (1951), *J.Appl. Mech.*, 18, p.203.
Niordson, F.I. (1965), *Exp.Mech.*, 5, p.29.
Orava, R.N. (1967), 1st Int. Conf. of the Center for High Energy Forming, Estes Park, Colo. (University of Denver).
Paul, B. (1968), Fracture, vol.2, ed.H. Liebowitz (New York: Academic Press), p.315.
Perzyna, P. (1963), *Quart.Appl.Math.*, 20, p.321.
Randall, M.R.D. and Campbell, J.D. (1972),

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

数学模拟和计算实验

А. А. Сатарский

物理学中的理论研究总是建立在数学的基础上，建立在所研究现象的主要数量特性的计算上。同时，采用的数学工具的复杂程度，通常由所研究物理对象的复杂程度以及获得研究结果时所要求的精确度来决定。而精确度又取决于研究的应用特性，取决于研究的实践目的。随着科学的发展，对理论物理研究的精确度的要求不断地增长，这是因为在设计和建造现代技术的复杂装置时，在这些研究中得到的资料是主要的（有时是唯一的）资料。这使得问题的数学描述非常复杂，并且使得以传统方法求解问题变得困难，或者简直是不可能的。

利用数学方法来研究物理学，这一新阶段已经随着制成高速电子计算机而到来。新的技术手段的出现引起了计算方法的蓬勃发展，引起了解复杂数学问题的新方法的研究，这些方法是以直接进行数值计算为基础的。在科学研究中广泛运用电子计算机不仅能够加速计算，而且根本上改变了计算的方式和方法。实际上，在最近二十年内，在理论物理研究中形成了一个新的方向，这个新方向以采用电子计算机为基础，并且在加快科学技术进步的速度中起了重要作用。这个新方向有不同的名称："计算实验"、"数学模拟"、"数学实验"等等。但是不管称什么，本质是一个在数学模型的基础上借助于电子计算机进行各种装置和物理过程的研究，"表演"它们在各种条件下的行为，找到正在使用或正在设计的结构的最优参数和状态。现在已可以进行复杂现象和技术装置的数学预测，而以其它方法来研究这些复杂现象和技术装置则是困难的。

研究整套数值方法和用于电子计算机的程序，在某些情况下相当于建造巨大的实验设备，因为计算实验（在某一阶段）可以代替一系列昂贵的和旷日持久的实物（物理）实验。

目前显而易见的情况是：集中在计算中心和联成网络的整套的大型电子计算机，以及在此基础上建立起来的掌握了现代研究方法的庞大的熟练科学工作者集体，这些都是巨大的战略潜力，在必要的时候，这种潜力可以用来解决宏大的国家任务。而这种国家任务是很多的。为了体会到这种国家任务的规模、重要性和迫切性，从中列举几个例子就足够了：核物理问题，核反应堆理论，受控热核聚变（УТС），等离子体物理，磁流体力学（МГД）-能量转换，激光物理，空气流体动力学、气象学，等等。

下面更详细地谈谈"计算实验"概念的含义[1]。

Univ. Oxford Report No.1047/22).

Ripperger, E. A. and Watson, H. (1968), Mechanical Behaviour of Materials under Dynamic Loads, ed. U. S. Lindholm. (New York: Springer-Verlag), p.294.

Rohde, R. W. (1969), *Acta Metall.*, 17, p.353.

Rohde, R. W., Butcher, B. M., Holland, J. R. and Karnes, C. H. (1973), Metallurgical Effects at High Strain Rates (New York: Plenum).

Rosenfield, A. R. and Hahn, G. T. (1966), *Trans. ASM*, 59, p.963.

Rosenfield, A. R., Hahn, G. T., Bement, A. L., Jr. and Jaffee, R. I. (1968), Dislocation Dynamics (New York: McGrow-Hill).

Shewmon, P. G. and Zackay, V. F. (eds.) (1961), Response of Metals to High Velocity Deformation (New York: Interscience) vol.9.

译自：Mechanical Properties at High Rates of Strain——Proceeding of the Conference on Mechanical Properties of Materials at High Rates of Strain, 1974/4/2-4, Oxford.

（孟 珊译 董务民、段祝平校）

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net