

## 7. 应力波传播、材料动态响应及定量无损检测

首席作者 R. J. Clifton

(美国 Brown 大学机械系)

由 P. S. Symonds, S. K. Datta 和 ASME/AMD 波传播技术委员会撰写初稿, J. G. Harris 和 C. B. Scruby 对初稿提出审阅意见.

**提要** 在现代工程技术中, 应力波的传播有着十分重大的意义, 因为它提供了在不透明材料中无损检测缺陷和非均匀性的主要方法; 并提供了研究在与冲击和爆炸有关的动态载荷条件下材料响应的唯一方法. 象核反应堆安全、集成电路检测及装甲侵彻等各种技术的进展, 强烈地取决于模拟应力波传播和改进表征材料动态响应特性等方面的进展. 在包括油藏勘探、地震监测以及预测因地震和爆炸载荷而产生的地壳运动等岩土工程和地球物理学应用的广阔范围里, 应力波起着主要的作用. 固体中应力波的固有复杂性(即三个波速、各向异性及非均匀性), 以及涉及强载荷应用中重要的非线性, 使得模拟应力波现象方面的进展, 决定性地取决于大规模的计算. 日益增多的超巨型计算机, 为模拟包括各向异性、非均匀性、缺陷、非线性和滑移界面等复杂性质的三维现象, 提供了取得进展的优越机会. 为了进行这些计算, 为了获得声学映象(这需要逆问题的算法. 在这些问题中, 缺陷的尺寸和形状, 以及密度和弹性模量的变化, 都是用超声波探测所关心的区域而得到的), 必须研究精确而有效的算法. 为了可靠地测定所需的几何特征和材料特性, 改进超声源和接收器的性能表示法是不可或缺的. 对材料的动态非弹性响应作进一步了解, 是实现所形成的计算能力的全部好处的关键. 应变率敏感度、剪切应变局部化、裂纹扩展、形成双晶以及相变, 全都是必须在应用动态载荷的情况下加以模拟的若干力学响应问题. 对材料行为的这些问题的基础实验, 与实验的计算机模拟相结合, 必将导致对基本机理了解的重大进展, 并由之改进用于计算的模型.

### 7.1 背景和当前的研究方向

在现代技术中极其重要的各个领域里, 固体中的应力波起着重要的作用. 在许多情况下, 象岩体爆破、装甲侵彻和打桩等, 应力波引起应用所需材料的变形和破坏. 在另一些情况下, 象地震映象和超声探伤, 应力波提供了探测物体的内部结构以确定其潜力的手段, 例如为了开采碳氢化合物或承受载荷. 在电子设备中, 应力波不但用来探测几微米尺度的缺陷, 而且还用在声电设备中. 还有其他一些应用, 象地震预报、岩石爆裂防护以及声发射中, 应力波作为测定破坏地点和猛度的一种手段, 以监测应力发源区所遭受的局部滑动或断裂, 从而可以采取缓解危险的措施, 当地震发生时, 应力波引起强烈的地运动, 这种地运动

• 252 •

由建造在地震源附近的建筑物所承受。另外，应力波不仅为确定材料在高压和高变形率下的非弹性响应提供唯一的手段，而且也测定材料的弹性模量提供一种有吸引力的手段。

对过去30年所进行的研究工作，使我们在对应力波的了解上有了较大的进展。对于均匀材料，定常正弦波在弹性杆、梁、板、壳中的传播，已彻底弄明白了。这些结果导致例如建立了通讯中使用的压电板振动频率与波长之间的已知关系。对于因缺陷（比如孔洞、夹杂物和裂纹）而引起弹性波散射方面的了解，已经取得进展。这些结果，已使得在使用超声波对结构构件作无损检测和缺陷表征方面取得了进展。对于在无界介质中平面波的传播，这些平面波自平板边界的反射，以及表面波的传播，都已有所了解。为了分析弹性波在成层介质中的传播而发展的技术，在解释地震记录和鉴别含油地质构造方面是很有用的。对导向表面波了解的增进，促进了声延迟线和表面波装置的研制。为了求解涉及复杂几何形状和非弹性、非均匀介质的应力波传播难题，建立了精确有效的数值方法。这些方法用来比如改善装甲抵御炮弹撞击的侵彻，以及测定一个隧道或地下洞穴是否能经得住给定的地面爆炸。

为了测定在准静态实验中无法达到，但在象装甲侵彻、动态断裂以及高速机加工这些应用中都具有重要意义的压力和应变率下一些材料的力学行为，发展了应用应力波的实验技术。在应变率为  $10^2\text{s}^{-1}$  和更高时，不能使用标准试验机，因为手柄的惯性使载荷测量不可靠。Kolsky 杆的研制，克服了这个困难。在 Kolsky 杆中，一个短试件夹在两个长的弹性杆之间，沿着一根杆传递一个应力波以加载试件。监测两根杆中的反射波和透射波，得到试件中的名义应力和应变率。在这种方法中采用压、拉和扭，以得到多种材料在应变率为  $10^3$ — $10^4\text{s}^{-1}$  时的应力-应变响应。为了把应变率的范围扩大到  $10^5$ — $10^7\text{s}^{-1}$ ，设计了一种相应的实验，称为压-剪实验。在这种实验中，试件是夹在两块弹性板之间的一块薄板。这些平行的板，相对于它们靠拢的方向作斜碰撞，在试件两个端面上产生压力和剪切摩擦力。在极高应变率下对金属的力学响应所作的这些研究的一个重要结果（一个标准的 10mm 试件在应变率为  $10^7\text{s}^{-1}$  下应变 1 秒钟，将得到可与从纽约到芝加哥的距离差不多的最终长度！）明显地表示出纯金属在足够高的应变率下流动应力的提高。人们期望用这种结果达到对动态断裂力学、高速率成形和高速机加工的了解。为了测量剪切应力，也采用了压-剪方式。在弹性流体动力学润滑中出现的高压和高剪切率下，剪切应力可以通过润滑剂传递。这些测量，对于研究由于牵引力驱动连续变量的传递，具有重要意义。

已进行了平板碰撞实验（在这种实验中，碰撞面是平行的，并且垂直于平板靠拢的方向），用以测定材料对超高压（高达几百 GPa）的力学响应。在材料所受的压力可与材料弹性模量相比的情况下，这些实验提供了材料热力学状态方程的基本资料。研制了所谓的斜波发生器。它是把减振板放在两块碰撞平板之间，能在单次实验中测得材料的名义等熵压力-体积关系，压力高达约 10GPa。这种实验已用来研究高压下材料的相变。对相变的冲击波研究的一项重要商业产品，是研究出了用碳生产高质量多晶金刚石的冲击波加工工艺。冲击波诱发相变，也用于进行象制造固体氢之类的基础科学探索研究。

应力波的传播对于了解动态断裂（包括动载荷对裂纹扩展的影响，以及从正在扩展的裂纹尖端发出的应力波的解释两个方面）起着必不可少的作用。为了测量材料断裂韧性而设计的实验，使应力波在裂纹尖端附近对材料施加强载荷。在这样一种实验里，即在有切口环绕而且在切口根部有疲劳裂纹的长杆上作实验，得到了在高加载率下金属起裂的临界条件。用

纵向拉伸波加载有裂纹的断面。在用监测长杆中的弹性波就能予以充分表征的条件下出现断裂。另外，象在 Kolsky 杆实验中，应力波实验提高了在充分表征的条件下可能达到的加载率（提高了几个量级）。这些高应变率情况下的测量，对于了解一些动态断裂问题，象因炮弹撞击而产生剥落以及管道的毁坏，都是必不可少的。

### 7.2 未来的研究方向

这里所谈到的最新发展，提供了当前波传播研究方向的一个指示，也提供了今后的一些重要方向。在弹性波情况下，需要进一步弄清各向异性和非均匀性的影响。完全用分析方法所能得到的一些主要结果，大半已得到了。无论如何，进一步研究暂态问题的数值解，可以期望会增进对与各向异性和非均匀性有关的现象的了解，并且提供一些经过改进的数值方法来求解特殊应用中的问题。一个应特别优先考虑的问题是所谓的逆问题，其中，源的特性或介质的力学性质是根据波形的遥测来测定。在逆问题方面的进展，可期望能对地震映象、地震监测、缺陷探测以及声发射这样一些领域都有重要裨益。需要作进一步的研究，来发展对短波长的高频波提供精确解的有效数值方法。这里，短波长的高频波主要受到传波介质的缺陷和微结构的影响。有必要对产生和接收超声波的传感器作更充分的研究，以便考虑到这些传感器的有限口径和考虑到传感器与所探测材料之间的耦合。必须研制声学显微镜，使其成为观测诸如与集成电路有关的那些微小缺陷的重要工具。这方面的进展，要求研究聚焦的超声波和一个流体层之间的相互作用，这个流体层是用来使声学显微镜与集成电路耦合。要想对从显微镜得到的图象作可靠的解释，就必须考虑非线性性、耗散和表面波的影响。利用以弹性波速随应力状态改变为基础的超声波技术来进行残余应力的测量，对于简单的几何形状已证明是有希望的。因为在许多应用中，增进对应力残余状况的了解是极为重要的，还因为缺少无损检测残余应力的方法，所以建议开展对用于测量残余应力的超声波技术作进一步研究。对于地震工程，需要研究从震源发出的辐射，研究强烈的地运动及其结果的预测，以及研究结构物与它们的运动支撑物之间的相互作用。为了预测地运动和结构-介质相互作用，需要增进对土的动力学行为，包括时间与土的力学响应之间关系的了解。

在与强载荷有关的非弹性波传播的领域里，必须研究在高速率加载状况下材料的力学响应的测量和模拟。对于由于断裂或由于局部化剪切变形带的发展而产生的破坏，需要知道其临界条件。为了模拟瞬态裂纹扩展和剪切带的增长，需要改进分析方法和数值方法。鉴于这些变形方式在高速碰撞应用中的显著作用，必须对双晶和相变有更深入的了解。对三维波传播问题则需要进一步发展计算机程序。必须对有限变形的模拟、破断机理的蕴含以及滑移界面的模拟，给予特别的注意。必须进行位错、剪切带和裂纹的动力学相互作用的研究，以便弄清一些会导致破坏的综合的过程，而如果不计及这些综合过程的可能性，这种破坏是不能预测的。

### 7.3 需要开展研究项目一览

对于所遇到的技术上的要求具有极大潜力的研究领域，包括下述方面：

- 在非均匀和各向异性介质中的波传播 测定复合材料和地质材料材料特性；介质和源的逆问题；用于生物介质和无损检测的声映象；阻尼；信号处理。
- 缺陷的探测和表征 弹性波与缺陷的相互作用；测定缺陷尺寸和主要特点的超声技术。

• 超声传感器性能描述 包括在波与缺陷相互作用中, 以及在输入(输出)电压-时间过程与产生的(弥散的)波形之间的关系中, 有限孔口的影响。

• 声学显微镜的研制 应力波透镜的设计和有关聚焦的超声波穿过一个流体层的传播问题的研究。

• 残余应力的超声测定 增进对非均匀介质中的非均匀应力场映象的了解; 第三阶弹性模量的测量。

• 声发射 在硬的脆性夹杂物处, 对裂纹成核的检测, 以及对现有裂纹扩展的检测。

• 地震工程 改进对穿过层状多孔、弹性介质的波的波源和传播的模拟; 结构物-介质的相互作用; 软的非均匀层对局部的地运动幅值的影响。

• 在高加载率下的力学特性 在高应变率和高压下, 流动条件和破坏条件的测定; 对形成剪切带的临界条件和对动态断裂临界条件的模拟; 双晶、相变以及多个缺陷的相互影响。

• 三维问题的计算 发展在超巨型计算机上求解瞬态应力波传播问题的有效算法。

• 能量沉积而产生的应力波 对于由于强激光与固体介质相互作用而诱发的应力波, 进行理论研究和实验研究; 生产中的应用。

## 7.4 参考书目

- Achenback, J. D. (1973). *Wave propagation in elastic solids*, Elsevier, New York.
- Aki, K. and Richards, P. (1980). *Quantitative seismology - theory and methods*, Freeman, San Francisco.
- Auld, B. A. (1973). *Acoustic fields and waves in solids*, Wiley, New York.
- Datta, S. K. (Ed) (1984). *Earthquake source modeling, ground motion, and structural response*, ASME, New York.
- Davison, L. and Graham, R. A. (1979). Shock compression of solids, *Phys Rep (Rev Sect Phys Lett)* 55, 257-379.
- Harding, J. (Ed) (1984). *The mechanical properties of materials at high rates of strain*, Proc of third Oxford conf, Inst of Phys, Oxford.
- Johnson, G. C. (Ed) (1984). *Wave propagation in inhomogeneous media and ultrasonic nondestructive evaluation*, ASME, New York.
- Knauss, G., Ravi-Chandar, K. and Rosakis, A. J. (Eds) (1983). *Dynamic fracture*, proc of workshop, Caltech.
- Mesall, J. and Weiss, V. (Eds) (1983). *Material behavior under high stress and ultrahigh loading rates*, Sagamore Army mal conf proc n 29, Plenum, New York.
- Pao, Y. H. (1983). Elastic waves in solids. *J Appl Mech* 50 (50th anniversary issue), 1152-1164.

孟 珊译自: *Appl. Mech. Rev.*, 36, 10 (1985), 1276-1278.

## 12. 用于高温和有害环境的结构系统

首席作者 F. A. Leckie

(伊利诺斯大学理论与应用力学系)

R. H. Gallagher, R. B. Haber, M. Klein, D. L. Marriott, D. H. Pai 和 M. J. Salkind 对初稿提出了审阅意见。

**提要** 对有害环境中高温下工作的承载结构系统的需求, 已经导致新的金属合金和非金属材料的发展。因为工作条件恶劣, 材料常经受严峻的加载环境和腐蚀环境, 所以只能设计有限寿命的结构系统。为了完成有效的设计, 必须了解材料的物理和力学性质, 以及这些性质与系统的运转性能有何关系。不但讨论了在寻求更先进和更经济的性能时必然提出的基础问题和计算问题, 而且讨论了与此有关的一系列问题。