

弹塑性波的研究现状与趋势

余同希 苏先穉 王晓东

北京大学力学系 (邮政编码100871)

提要 本文系统总结了弹塑性波理论的研究现状,并介绍了当前在弹塑性波理论和相关的工程领域中的重要课题。分析并指出了今后弹塑性波问题的研究趋势。

关键词 弹性波; 塑性波

1 引言

自1821年 Fresnel 提出可以用弹性固体介质中的横波来解释光的偏振现象开始,弹性波理论的研究已经有170年的历史。最初感兴趣的主要是应用数学家,在19世纪,Navier (1821), Cauchy (1822), Poisson (1829), Lamé (1852) 及 Rayleigh (1887) 等人的开创性工作奠定了经典弹性波理论的基础。随后在地球物理学和地震学中得到了重要应用。人们相继发展了弹性波函数法、积分变换法、特征函数展开法及广义射线法。对弹性半空间中的波传播、层状介质中的波传播、波的散射及衍射以及波导中的波传播等问题开展了广泛的研究,基本解决了均匀各向同性介质中的线弹性波传播问题。Achenbach (1973), Miklowitz (1978), Pao (1983) 等都对弹性波经典理论作过详细的综述。

二次世界大战期间和战后,由于军事工程的需要,弹塑性波和固体中的冲击波迅速受到重视和广泛研究。近20—30年来这一研究领域始终十分兴旺与活跃,主要表现在以下几方面:①不限于均匀各向同性介质中的弹性波,而是涉及越来越多的复杂介质,如层状介质、弹塑性介质、粘弹性介质、粘塑性介质及各种非线性、非弹性介质,揭示这些介质中波的传播规律;②不限于宏观的、唯象的、连续介质中的波的传播问题,更多地注意到介质内部界面、裂纹、孔洞、各种夹杂及微结构对弹性波传播产生的影响,而且这些研究同反问题的理论研究和数据处理技术相结合,正成为目标探测、无损检测和材料评估的重要手段,成为细观力学和材料科学的有力工具;③弹塑性波已成为研究极端条件(高压、高应变率等)下材料行为的重要武器。波与材料损伤、失效之间的联系也成为研究热点。

对以上问题,不但国际上展开了广泛的研究,而且国内的中国科学院力学研究所、中国科学技术大学、哈尔滨工业大学、哈尔滨工程力学研究所、华中理工大学、同济大学、太原

* 国家自然科学基金资助调研项目。本文曾在1990年11月北京“固体力学发展趋势研讨会”上宣读。

工业大学、北京大学等单位也开展了不少研究。下面,我们分6个方面介绍这个领域的研究现状与趋势。

2 弹性波的散射

弹性波有穿透金属、陶瓷、复合材料等固体材料的能力,同时当波在介质中遇到障碍物(夹杂、裂纹、孔隙等),时会发生散射现象,对弹性波散射的研究除用于确定散射体引起的应力场变化和应力集中之外,也作为获取有关材料和结构内部信息的重要手段。

Clebsch (1863) 最早分析了球形夹杂物引起的弹性波散射。但在早期,除了地震学应用外,弹性波散射很少引起人们的注意。直到本世纪50年代以后,地下爆炸等军工技术的发展才又引起人们对这一问题的重视。Pao和Mow(1973)的专著总结了这一时期关于低频稳态波的散射和应力集中,以及对瞬态脉冲的动态响应等问题的研究。对于一般形状的散射体引起的散射问题,已经成功地发展了几种有效的分析方法,如波函数展开法、T矩阵法、积分方程法及匹配渐近展开法等,详见Varadan (1980), Kobayashi (1981), Shaw (1979) 及 Seybert 等 (1982) 的工作。目前,弹性波散射理论已经在以下几个方面得到深入发展。

2.1 裂纹对弹性波的散射 裂纹作为一类特殊的散射体,对弹性波的散射有其独特的性质。随着断裂力学的发展,这个问题成为人们关心的一个热点。Fridman (1948) 最早研究了刚性半无限长裂纹的弹性波散射问题。后来,Maue (1953) 和 De-Hoop (1958) 分别解决了半无限长裂纹对平面波散射问题,给出了短时域解和全时域解。60年代后,裂纹对弹性波的散射问题得到了广泛的研究,Sih (1977) 在他的专著中总结了这方面一系列富有成效的工作。后来,Achenbach 及其学生们 (1978—1984) 相继对各种裂纹对弹性波散射问题进行了大量工作,详细研究了裂尖附近的特性,而且也研究了远场特性。迄今为止,2维均匀介质中单一裂纹的弹性波散射问题已基本解决。但对于多裂纹问题还只限于裂纹排列较简单的情况,如共线裂纹及周期分布裂纹等。

工程中常遇到的3维裂纹弹性波散射问题是更难以解决的一类问题,已进行的研究工作较少,目前还没有形成有效的求解方法。所采取的手段主要是近似解和数值解(如,Datta 1979, Wilkin 1977)。最近也有人尝试使用积分方程方法进行求解。

界面裂纹的弹性波散射问题是随着对新材料的不断使用和断裂机理的深入研究而逐步受到人们重视的另一重要课题。对于简单几何形状下单个界面裂纹对稳态波的散射问题已经有较多研究且取得了较大的进展(如Srivastava 等1978,1979, Neerhoff 1979,等)。近期还在进行这方面的工作。但这类问题中还遗留着难以解决的困难,即界面裂纹尖端的振荡奇异性。相应的多个界面裂纹对弹性波的散射问题也进行了部分工作,但还限于简单的反平面形变状态。

2.2 无损检测技术 无损检测技术(NDT)是在70年代基于弹性波散射理论而发展起来的一项新技术。传统的超声波检测技术只适用于探测缩孔和气泡这类缺陷。而在许多工业领域中,为断裂力学评估收集信息,探测尖锐的、平面型和裂纹型缺陷则是主要目标。这需要以这些缺陷的散射特性为基础的更先进的方法。这种需求刺激了弹性波散射理论的研究,反之,对弹性波与缺陷相互作用的透彻了解及高速数字处理技术的发展又大大促进了NDT的发展和广泛应用。

前面提到的球体和圆柱体引起的散射场的解及2维裂纹问题的散射解可应用于探测球形、

圆柱形的空穴、夹杂及 2 维裂纹。优化截断法和畸变波博恩近似法 (DWBA) 已被应用于模拟缺陷探测的可靠性和研究确定缺陷尺寸的反演散射技术。裂纹尖端的衍射信息和反射波的干涉现象已用于复现涡轮转子模拟孔腔内的疲劳裂纹边缘, 确定核电站压力容器焊件中裂纹尺寸等。裂纹尖端衍射的 Rayleigh 波的干涉信号用于确定表面裂纹的尺寸。此外, 剪切横波的长波散射还被用于探测焊接件中裂纹及其尺寸、各向异性弹性常数的缺陷、区别裂纹和夹杂等。为探测 3 维缺陷形状而发展起来的博恩近似反演法 (IBA) 和物理光学远场散射反演技术 (POFFIS) 已广泛地应用于确定空穴形状及从空穴产生的裂纹等复杂情况, 详见 Thompson 等的文献 (1983)。

NDT 在处理简单形状的单裂纹和多裂纹问题是成功的, 但面对实际工程结构中更加复杂的缺陷情况, 如尖端附近产生了凹凸不平多处接触的疲劳裂纹, 沿晶粒边界有许多小平面和支裂纹的晶间腐蚀裂纹, 具有不规则形状的夹杂和只是局部与基体接触的夹杂等等, 在材料性质的测定上都还需要做大量的工作。

2.3 共振散射技术 经典弹性波散射理论一般是认为散射体为不可穿透的, 实际上许多散射体是可以穿透的。此时, 内波场和外波场在交界面上耦合。当入该波非常长或非常短时, 散射信号将以较简单的方式返回到信号传感器上。但当该波长介于长波 (Rayleigh) 和短波 (Geometrical) 区之间的共振区时情况就大不一样了。对于可穿透的散射体来说, 共振区 (resonance region) 变得非常宽, 没有上界。在这个区域里, 散射导致的表面波在环绕散射体时相位增强, 将引起物体剧烈共振, 无论采用解析方法、数值方法还是实验方法来解决都十分困难。70 年代以后, 为解决这一难题发展了一种新的共振散射技术 (RST), Gaunard (1989) 对此作了详细介绍。RST 理论最重要的贡献在于将散射振幅分解为两个分量, 一个分量相应于具有同样几何形状的空穴的影响, 而另一分量是相应于充满介质的一组振荡模态。这样, 散射体外形和材料的影响可以按复频率平面上极点位置的不同而分离处理。现在已有人专门计算和展示了 46 种金属球的声呐截面 (SCS), 构成材料响应库。这将大大有益于目标监测和 underwater 结构的分类。这些进展促进了声呐、雷达技术, 而且推进了无损检测技术和海洋地貌测定技术的进展。这种技术还可以用于确定涂层的绝缘常数和厚度, 这使其能鉴别真实的雷达目标与可能的绝缘假诱饵。

RST 使许多现象得到了清晰的物理解释, 并且使大量计算得到简化。但目前这种技术还只被用于有限的一些情况, 对一般散射问题的应用还有待于进一步的工作。

3 层状介质和复合材料中的弹性波

层状介质中的波是一个经典课题。由于复合材料的大量使用和工程实际中对地壳等层状介质更精确描述的要求, 复合材料中的波从 60 年代起成为热门课题。已有大量文献报道这方面的工作。Pao (1983) 详细评述了 1983 年以前波导和层状介质中弹性波的理论问题。Ting (1980, 1986) 详细总结了 1986 年前复合材料和层合板中波传播问题的各种近似理论及应用。

3.1 层状介质中弹性波问题的经典理论 层状介质中弹性波传播的特点在于由界面的反射使弹性波传播在整体上表现出频散特性。这类问题中的一个重要工作是确定和求解频率方程。随着层状介质层数的增加, 频率方程会越来越复杂。这方面工作的一个重要进展是 Thompson (1950) 和 Haskell (1953) 提出的传递矩阵法, 通过将 n 层介质的大矩阵转化为

n 个小矩阵的乘积而大大简化了计算频谱曲线的工作。Pao (1983) 曾详细总结了层状介质中定常波的其他问题。层状介质中的瞬态波问题一般是采用积分变换法进行求解。一方面需研究频率方程, 另一方面还要得到积分变换的反演。Kennett (1981) 总结了 80 年代前关于瞬态波的工作。根据反演顺序的不同可以分为频谱法和波慢度法。由此可以得到用于数值计算的反射率法 (Kennett 和 Clarke 1983) 及熟知的广义射线法 (参见 Miklowitz 1978)。定常波和瞬态波问题在理论上都已基本完善了, 进一步的工作主要是新问题的解决和已有方法的改进。

对于复杂层状介质, 也出现了求解频率方程的近似方法。如 Kausel (1986) 对于各向异性层板将每个层分成若干个子层, 同时将位移场在每个子层中沿厚度方向展开, 将频率方程的求解转化为有限个模式的代数特征值问题。研究了各向异性层状介质中谐波问题。

3.2 复合材料中的弹性波 从 60 年代中期开始, 复合材料中的波问题迅速成为一个研究热点。和经典问题不同, 人们的目的主要是寻求一种简单而实用的近似理论。Ting (1980, 1986) 详细评述了这方面的工作。对于一般层状复合材料, 发展了一系列适用于材料特征长度同波长相比较小情况下的等效介质理论, 如等效模量理论、等效刚度理论、混合理论、相互作用连续统理论 (详见 Ting 1980)。通过将实际复合材料等效为一种均匀介质, 可以确定具有适当精度的频率方程。这些近似理论既可以用于稳态波也可用于瞬态波, 但要获得较高精度则需采用较高阶的近似模型, 这在具体计算中会遇到困难。

另一种有效近似理论是 Baker (1971) 根据实验中观察到的复合材料中波的衰减提出的粘弹性等效介质模型, 或称粘弹性比拟法。这种方法的关键在于确定等效粘弹性体的松弛函数。Ting 和 Mukunoki (1979, 1980) 给出了层状复合材料中垂直于层传播的瞬态波的松弛函数的具体形式, 处理了各层为弹性或粘弹性的复合材料中的瞬态波问题, 得到了和精确解吻合良好的结果。近期国内也开展了这方面的工作。

对于纤维尺寸为有限体积的短纤维复合材料。Aboudi (1986, 1987a, b, 1988) 推广了用于长纤维复合材料的高阶等效刚度法, 使之适用于具有有限夹杂的周期复合材料, 并用于研究复合材料对瞬态冲击的响应及复合材料界面脱层问题, 以及复合材料中分布的损伤、裂纹对弹性波的影响。

随机复合材料中波传播问题是另一类重要课题。Beltzer (1983a, b, 1984, 1985) 给出了一种利用 Kramers-Kronig 关系研究弹性波传播的方法。通过用等效均匀介质来模拟随机复合材料, 可以方便地确定随机复合材料的动态特性。

人们对各种复合材料中波传播问题还提出了许多近似理论, 如 Drumheller 等 (1973) 的点阵模型; Eringen (1970) 等的微观连续统模型; Chao 等 (1975) 的离散型连续理论等, 但都尚未令人满意。对于层状介质和长纤维复合材料, 近期内出现新的更完备的理论是比较困难的。相反, 可以预料, 短纤维和随机复合材料中弹性波问题将会进一步得到广泛的研究。

4 弹塑性波

材料受到较强冲击时会产生非弹性变形, 在金属材料中主要表现为弹塑性波。此时, 应力波传播和材料本构关系是本征耦合的, 这加大了问题的复杂性, 同时也推动了塑性波理论的研究。对于塑性波问题的早期工作, Clifton (1974) 曾进行了一般的评述。在 Kolsky

(1953), Goldsmith (1960), Johnson (1972), Nowacki (1978), Zukas (1981) 及杨桂通 (1984) 和王礼立 (1985) 的著作中都进行过有关的论述。

4.1 1 维波 Donnell (1930) 最早研究线强化金属丝中应力波传播问题, 发现存在两种波阵面, 一种为弹性波, 另一种为塑性波。较完备的塑性波理论是第 2 次世界大战中 Karman (1942), Taylor (1942) 和 Rakhmatulin (1945) 独立发展起来的。按这种理论, 各种水平的应变以本身的特征速度传播, 对于上凸的应力-应变曲线会形成稀疏波, 而对于上凹的应力-应变曲线会形成冲击波。后来, Lee (1952) 及 Clifton (1968) 和 Ting (1971) 进一步研究了杆中卸载波特性, 基本上完善了率无关材料的 1 维应力波理论。

然而, 相应的实验发现 (Bell 1951) 杆中存在总是以弹性波速传播的增量波, 这和理论预测的结果不符合。Malvern (1951a, b) 首先考虑了应变率相关材料中塑性波传播理论, 指出可以得到塑性扰动仍以弹性波速传播的结果。但考虑率相关性后, 不能预测实验观察到的塑性波前后方均匀塑性区的存在, 而这一点已被率无关理论所预测。后来的研究表明, 对于端头受碰撞的杆, 这两种理论的差异主要表现在碰撞后早期及碰撞端附近的位置, 随时间增加, 率相关理论的解将趋于率无关理论的解 (Alter 和 Gurtis 1956, Malvern 1951b, Rubin 1954)。

由于率无关理论和率相关理论都不能很好预测塑性波传播的全过程, 应用哪一种理论是个一直争论的问题。另一方面, 已有研究表明, 可以预测和分析某一实验结果的本构关系缺乏唯一性 (Ripperger 1968, Percy 1963, Wood 和 Phillips 1967, Lawson 和 Nicholas 1972)。可见, 利用一个假定的本构关系来解释塑性波传播实验时必须非常小心。

另一类重要的 1 维应力波是单向应变波。这种应变构形与平板撞击实验确定材料动态特性问题密切相关, 主要用来研究应力水平较高时应力波的传播。由于体应变的作用, 对于弹性-理想塑性材料也存在一个弹性波和一个塑性波构成的双波结构 (Morland 1959)。当应力水平较高时, 体积模量增加, 会导致一个上凹的应力-应变曲线而产生冲击波。单向应变波的另一个特点是即使没有反向外载也会产生反向屈服, 从而产生塑性卸载波。对单向应变波中的率效应也进行了研究, 并和实验结果符合较好 (如 Butcher 和 Karnes 1966; Jones 1968)。但由于问题的复杂性, 主要还限于应变率无关理论。

弹塑性球面波和柱面波的简单问题已经基本解决, 其传播特性和 1 维应变波相似。但直到最近, 球面波的工作还在继续。Milne 和 Morland 等 (1988a, b) 给出了球形孔洞受均布渐增分布力作用的无限大介质中弹塑性波问题的解答, 并将其作为对弹塑性波问题数值解的一种验证。

可见, 和 1 维应力波相比, 1 维应变波、球面波、柱面波都还没有达到完善的程度, 还有不少理论工作可做。

4.2 复合应力波 复合应力波的研究是弹塑性波理论进一步深化的必然趋势。在 60 年代, 许多著名塑性动力学专家都参加了这一工作, 以丁启财在 1973 年提出了平面和柱面复合波的统一理论作为总结。发现在等向强化和率无关材料的复合应力波传播中存在着弹塑性耦合的快波和慢波。Lipkin 和 Clifton (1970) 讨论过考虑 Bauschinger 效应的随动强化问题。Clifton (1968) 和 Ting (1969) 曾研究过不同情况下复合应力波中卸载波速的上、下限。后来, 对 2 维应力波的反射问题及冲击波的反射问题也进行了部分工作。但就整体说来, 这

部分工作还是很不成熟的。到目前为止,某些基本规律和基本方法也在继续探索之中;

对复合应力波传播的数值方法也进行了研究工作,就2维弹塑性波及弹塑性冲击波问题得到了一些有益的结果。这为复合应力波理论的工程应用提供了一条途径。

4.3 结构中的弹塑性波 作为基本结构元件的梁内的弹塑性波问题有很大理论和实用价值,而又一直未解决,只是对于特殊情况才给出了一些结果。

Duwcz (1950) 及 Conroy (1956) 应用一种广义自相似法解决了受匀速集中载荷作用的无限长和半无限长弹性理想塑性 Euler 梁的弹塑性动态问题,结果表明,表征塑性扰动前沿的塑性铰都是以非均匀速度运动的。在最近工作中 Wang 和 Yu (1992a) 提出利用弹塑性分离结合振型展开法解决一般的弹性-理想塑性夹层梁的动态问题。对端头受脉冲载荷作用的悬臂梁的计算发现,尽管从总的趋势来看,塑性区从端部向根部运动,但梁内弹性、塑性变形不断相互转换,响应模式非常复杂,塑性铰在运动中多次消失和出现(经历不断的加载和卸载)。显然,有限长梁内弹塑性波的传播比无限长梁问题复杂得多。

综上所述,弹塑性波理论虽然已经发展了几十年,目前看来较成熟的还只是1维应力波及应变波问题。即使对于简单问题,使用何种本构关系的争议并没有完全解决。复合应力波遗留的问题更多,复合波中弹塑性边界的处理仍是一个未完全解决的问题。梁内弹塑性波问题是一个令人感兴趣而又未解决的问题。对于有限长梁,在最大弯矩峰传播过程中,由于其幅值的变化使塑性铰不断出现、消失,弹性状态和塑性状态的这种频繁转换给梁中“塑性弯曲波”的定义造成了困难。以至于对梁中是否存在塑性弯曲波这个基本问题还需进一步探讨。

5 其他非线性波问题

除弹塑性波之外,波传播过程中其他非线性因素的影响也得到了广泛的研究。这一方面是应力波理论发展的必然结果,另一方面也和新材料的出现及新现象的发现密切相关。

5.1 几何非线性的影响 对于均匀各向同性介质中平面纵波问题,几何关系中导数2阶项的影响很早就得到了研究(Bland 1965, Pipkin 1966, Spence 1973, Larder 1976),结果发现,波型畸变为应变的量级。Larder (1985) 的研究表明,对于线性化后成为反平面剪切的波,几何关系2阶项非线性引起的波型畸变为应变平方的量级。Haddow (1987) 最近研究了轴向剪切波在不可压缩各向同性超弹性固体中传播问题,结果表明,考虑到有限变形非线性影响后,在阶跃载荷下,将会产生冲击波。

对于表面波问题也进行了类似的工作。Parker (1978), Talbot (1982), Parker 和 Talbot (1983, 1985) 先后研究了各向同性弹性介质中考虑高阶位移导数影响的非线性表面波问题。Parker 和 Talbot (1985) 的工作表明,存在具有和 Rayleigh 波不同的表观相速度的波型,也存在和 Rayleigh 波具有相同表观相速度的波型。

5.2 非线性弹性介质中的波 对于非线性弹性介质,可能存在两种类型的波传播,如果应力-应变曲线的切线模量随应力增加而减小,则会产生和塑性加载波相似的非线性波;反之,如果切线模量随应力增加而增加,则将产生冲击波。如 Borralli 等 (1985, 1987) 基于奇异面理论研究了两个非线性弹性材料组成的各向异性混合物中加速度波的问题,详细研究了特殊情况下间断面的传播特性;Bailey 等 (1985) 研究了非线性弹性材料中1维冲击波的间断特性。

由于非线性弹性本身不会产生新的物理现象,数学方法上也不存在根本的困难,因此,进一步的工作将主要结合其他问题进行。

5.3 界面接触应力波 Comninou 和 Dundurs (1977, 1978) 研究了两个可以自由分离的弹性介质界面上波的传播问题,结果表现出存在波速介于Rayleigh波速和剪切波速之间的接触应力波。Freund (1977) 详细研究了这一问题后指出这种波对应着一种不合理的能量转换关系,因而这种波是一种虚假的波。这个问题的进一步研究还没有看到。

Barnet等(1988)研究了两个滑动接触各向异性半空间界面上的波,称为滑动波。结果表明,对各向同性半空间,仅存在一种或不存在滑动波模式;而对于两个各向异性半空间,可能存在新的滑动波模式,称为第2滑动波。界面接触的研究带来许多新的概念,然而,这方面的工作还较少。这类问题的困难在于接触产生的非线性及运动边界。这个问题无论在理论上还是在应用中都有大量急待解决的课题。

此外,应变软化材料中的波是根据新现象提出的新课题,这个问题的研究还刚刚起步,一些基本概念和特性还不十分清楚。无疑这是一个需要进行深入研究的新领域。

6 波的反问题

反问题源于地震研究,近来在遥感遥测、无损探伤、诊断成像、核磁共振分层现象等许多领域中都不断被提出,形成了一个有重要价值的学科分支。波的反问题常与波的散射、衍射相联系,但由于它与数学物理问题中的反问题在数学方法上有共同性而被单独作为一个分支。

反问题一般分为反源问题和反介质问题,以及反源-反介质问题。由于反问题的信息一般来讲是一些离散的数值,问题的数学提法不十分清楚。即使有了数学描述也难以确定提法是否合理、所得的解是否唯一。而且即使正问题是线性问题,它的反问题也是一个非线性问题,求解非常复杂。因此,大量的论文都是针对解决具体问题而提出某种近似解法。

在反介质问题中,1维介质的阻尼问题最早引起人们的注意,50年代就系统建立了 Sturm-Liouville(S-L)方程反问题理论。这在反问题中是理论最完善的,但它的有效算法和数值方法尚待建立。在应用领域,更多的途径是根据具体的物理背景采用不同的方法求解。

求解反源问题一般采用两种方法,一种是求解积分方程法,另一种是选择出源参数对记录参数之间的映照关系。但这些方法在应用中都存在各种困难。至于反源-反介质问题,由于源和介质参数双双混入数据,目前尚不清楚是否能将它们分离出来。Thompson(1986)和 Onoe (1986) 分别综述了这方面的工作。

总之,已经解决的波动问题的反问题非常有限。即使已经求解的问题,其求解方法的有效性、模型的可靠性等都因问题而异。这是一个尚待开发、大有可为的领域。

7 波引起的材料和结构的失效和破坏

1914年 Hopkinson 研究爆炸效应对,观察到一种很有意义的痂片现象,后来被称为层裂(spallation)。大约35年后,从1950年开始,工程界才开始注意应力波引起破坏的现象。层裂现象和许多工程领域关系密切,如预防层状结构或非均匀介质的脱层或层裂,岩土爆破时产生的介质大面积崩落及坦克外壁炸药爆炸引起的内壁碎片杀伤等。从机理上讲,层裂或崩落是由于高强度压应力波在材料的自由表面反射为拉应力波造成的拉伸破坏,破坏产生的新表面使这种反射过程进行下去并造成多重层裂(multiple spallation)。

对于层裂的临界条件已经做过很多研究,但大多是针对具体材料的实验研究,理论分析

还十分欠缺。早期主要是从宏观上用应力波的应力水平作为判据。新近的研究(如Gilath和Eliczer 1989)指出,在韧性材料中,层裂的产生是由塑性变形局部化所控制的,这种局部化的塑性变形常围绕材料中的微孔洞发生,孔洞生长并连接成了层裂平面;在脆性材料中,层裂过程由微裂纹的扩展控制,即当塑性变形还并不大时,微裂纹就发生了动态扩展。Gilath和Eliczer(1989)的工作表明,采用强激光脉冲照射金属箔可以产生0.03mm的层裂薄层,此薄层可经历高达 10^7s^{-1} 的极高应变率。他们的照片表明,铝在层裂中呈韧性,而低碳钢则呈脆性。

Eftis(1989),Kotoul等(1989)分别用不同的本构模型对韧性材料和脆性材料中层裂生长至层裂的过程进行了计算和实验的比较研究。应力波产生材料损伤和破坏的方式不仅限于表面附近的层裂,应力波在固定表面上反射产生的压力的增强、应力波在若干平面或曲面上反射所造成的聚焦,都可能造成材料内部的破坏。这方面的实验和数值模拟都已屡见报道,需要探索的问题仍然是破坏准则和破坏机理的确定。失效的微观机理,如应力波与微孔洞、微裂纹、剪切带的相互作用,则还是远未解决的问题。

以应力波和裂纹的相互作用为例,目前断裂动力学研究的一般是冲击载荷作用下裂纹的启裂条件等问题,一旦裂纹开始快速扩展,就需要研究在具有运动边界的情况下应力波传播问题。此时,裂纹的扩展规律和应力波的传播完全耦合在一起。目前仅在假设简单裂纹扩展规律的条件得到一定结果,还没有见到考虑到耦合影响的解答。事实上,对于运动裂纹采用何种判据还不十分清楚。

除了波引起的材料破坏之外,应力波作用于杆、梁、板、壳等结构物时,也可能导致结构的失效。例如,长杆弹体高速撞击到靶体时,弹体可能发生动力屈曲,这也是一种失效模式。作为理论模型,现在正在研究轴向撞击下长杆或圆柱壳中应力波的传播同屈曲间的关系。还有的薄壁构件(如圆管)当曲率增大到一定程度时由于截面的畸变导致抗弯能力下降,即出现所谓“结构软化”现象;在这种软化结构中应力波的传播是否会导致结构的变形局部化以至失效,也是正在研究的一个问题(Wang和Yu 1992b)。

8 简短的结语

弹塑性波的研究目前仍是固体力学中一个十分活跃的分支,它同固体力学其他分支有着内在的联系,而且这种联系越来越密切。总体上看,以下研究趋势是特别值得注意的。

①进一步研究波和材料本构间的关系,分析各种已知本构关系的材料中波的特性及反过来通过波的传播提供的信息研究本构关系。这使波与连续介质力学、粘弹性力学、塑性力学等理论分支建立密切联系。

②同细观力学和材料科学紧密结合起来,分析各种材料细观结构对波传播的影响,研究复合材料及各种新材料中波的传播规律。

③同现代破坏力学结合起来,研究波引起的失效和破坏的机理及其实际应用。这方面的研究已经并将继续深入到材料内部的非完善性(如裂纹、孔洞、夹杂等)而和断裂力学、损伤力学、地球动力学和冲击动力学中的具体问题结合起来,并成为其中不可缺少的部分。

④和实验力学相结合,利用波的特性研究材料和介质内部情况,推动无损检测、无损评估等有重大实际意义的实验技术的发展,并使其成为实验固体力学的新原理、新方法、新技术的重要源泉。

⑤发展新的数学解析方法和数值计算方法, 解决由于材料非线性或几何非线性引起的各种非线性波的传播问题以及波的反问题。

参 考 文 献

- Aboudi J. 1986. *Wave Motion*, **8**: 289—303
——. 1987a, *ibid*, **9**: 141—156
——. 1987b, *Compos. Sci. Technol.*, **28**: 103—128
——. 1988, *Int. J. Solids Struct.*, **24**: 117—138
Achenback J D. 1973. *Wave Propagation in Elastic Solids*, North Holland, Amsterdam
Bailey P B, Chen P J. 1985, *J. Elasticity*, **15**: 257—269
Baker L M. 1971, *J. Composite Materials*, **5**: 140—162
Barnett D M, Cavazza S D, Lothe J. 1988, *Proc. R. Soc. Lond. A*, **415**: 389—419
Bell J F. 1951. Tech. Report No. 5 US Navy Contract N6—ONR—243, Johns Hopkins University
Beltzer A I, Brauner N. 1985, *J. Mech. Phys. Solids*, **33**: 471—487
——. 1983a, *J. Acoust. Soc. Am.*, **73**: 355—356
——. Brauner N. 1984, *ibid*, **76**: 962—963
——. Bert C W, Striz A G. 1983b, *Int. J. Solids Struct.*, **19**: 784—791
Bland D R. 1965, *J. Inst. Math. Applics.*, **1**: 56—75
Borrelli A, Patria M C. 1985, *Acta Mechanica*, **57**: 25—40
——. ———. 1987, *ibid*, **67**: 91—106
Butcher B M, Karnes C H. 1966, *J. Appl. Phys.*, **37**: 402
Chao T, Lee D C Y. 1975, *J. Acoust. Soc. Am.*, **57**: 78—88
Clebsch A. 1863, *J. fur die reine und angewandte mathematik*, Bd. **61**: 195
Clifton R J. 1968, *J. Appl. Mech.*, **35**: 782—786
——. 1974, in: *Mechanics Today* (Nemat-Nasser S, ed), Vol. 1, Pergamon
Comninou M, Dundurs J. 1977, *J. Appl. Mech.*, **44**: 222—226
——. ———. 1978, *ibid*, **45**: 325—330
Conroy M F. 1956., *ibid*, **23**: 239—243
Datta, S K. 1979, *ibid*, **46**: 101
——. Fortunko C M, King R B. 1982. Review of Progress in NDE 1
DeHoop A T. 1958, Sc. Ph. D. Dissertation, Technische Hogeschool, Delft, Holland
Donnell L H. 1930, *Trans. ASME*, **52**: 153
Drumheller D S, Sutherland H J. 1973, *J. Appl. Mech.*, **40**: 146—154
Duwez D E, Clark D S, Bohnenblust H F. 1950, *ibid*, **17**: 17—34
Eftis J, Names J A, Randle P W. 1989, *Advances in Plasticity*, Pergamon Press: 381—384
Eringen A C. 1970, *Int. J. Eng. Sci.*, **8**: 819—828
Freund L B. 1978, *J. Appl. Mech.*, **45**: 226—227
Fridman M M. 1948, *Dokl. Akad. Nauk., USSR*, **60**: 1145
Gaugaurd G C. 1989, *Appl. Mech. Rev.*, **42**(6): 143—187
Gilath J, Eliezer S. 1989, *Advances in Plasticity*, Pergamon Press: 393—396
Goldsmith W. 1960, *Impact*, Edward Arnold, London
Haddow J B, Lorimer S A, Tait R J. 1987, *Acta Mechanica*, **66**: 205—216
Haskell N A. 1953, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **43**: 17
Johnson W. 1972, *Impact Strength of Materials*, Crane, Russak, New York
Jones A H, Maiden C J, Green S J, Chin H. 1968, in: *Mechanical Behavior of Materials under Dynamic Loads* (U S Lindholm, ed), Springer-Verlag, New York: 254
Karman T von. 1942, *Nat. Def. Res. Council. Rep. A-29*
Kausel E. 1986, *Int. J. for Numerical Methods in Engineering*, **23**: 1567—1579
Kennett B L N. 1981, in: *Advances in Applied Mechanics* (Yih C S, ed), **21**: 79—169
——. Clarke T J. 1983, *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, **72**: 633—645
Kobayashi S, Nishimura N. 1981, *Developments in BEM-II* (Banerjee P K, Shaw R D, eds), Applied Science, London: 177—210
Kolsky H. 1953, *Stress Waves in Solids*, Clarendon Press, Oxford

- Kotoul M, Bilek Z. 1989, *Int. J. Frac.*, **41**: 207—221
- Lardner R W. 1976, *Proc. Roy. Soc., A* **347**: 329—344
- . 1985, *J. Elasticity*, **15**: pp. 53—57
- Lawson J F, Nicholas T. 1972, *J. Mech. Phys. Solids*, **20**: 65
- Lee E H, Symonds P S. 1952, *J. Appl. Mech.*, **19**: 308
- Lipkin J, Clifton R J, Part 1, 1970, *ibid.*, **37**: 1107—1112; Part2, 1970, *ibid.*, **37**: 1113—1120
- Malvern L E. 1951a, *J. Appl. Math.*, **18**: 203
- . 1951b, *Quart. Appl. Math.*, **8**: 405
- Maue A W. 1953, *ZAMM*, **33**: 1—12
- Miklowitz J. 1978, *The Theory of Elastic Waves and Wave Guides*, North Holland, Amsterdam
- Milne P C, Morland L W, Yeung W. 1988a, *J. Mech. Phys. Solids*, **36**: 15—28
- . 1988b, *ibid.*, **36**: 215—236
- Morland L W. 1959, *Phil. Trans. Roy. Soc. London, A* **251**: 341
- Mukunoki I, Ting T C T. 1980, *Int. J. Solids Struct.*, **16**: 239—251
- Neerhoff F L. 1979, *Appl. Sci. Res.*, **35**: 237—249
- Nowacki W K. 1978, *Stress Waves in Non-Elastic Solids*, Pergamon, Oxford
- Onoe M, Yamaguchi K, Takahashi H. 1986, *Progress in Acoustic Emission*, Japanese Soc. for N.D.E., Tokyo
- Pao Y-H. 1983, *J. Appl. Mech.*, **50**: 1152—1164
- . Mow C C. 1973, *Diffraction of Elastic Waves and Dynamic Stress Concentrations*, Crame and Russak, New York
- Parker D F, Talbot F M. 1983, in: *Nonlinear Deformation Waves* (U Nigul, J Engelbrecht, ed) . Springer, Berlin
- . 1985, *J. Elasticity*, **15**: 389—426
- . 1978, Technical Report 78-26. I. A. M. S., University of British Columbia
- Percy J H. 1963, *Proc. Symp. Structural Dynamics under High Impulse Loading*, Tech. Rep. ASD-TDR-63-140, Wright-Patterson AFB, Ohio; 123
- Rakhmatulin K A. 1945, *Prikl. Mat. Mekh.*, **9**: 91
- Ripperger E A, Watson H. 1968, in: *Mechanical Behavior of Material under Dynamic Loads* (U S Lindholm, ed) . Springer-Verlag, New York; 294
- Rubin R J. 1954, *J. Appl. Phys.*, **25**: 528
- Seybert A F, Soenarko B, Rizzo F J, Shippy D J. 1982, ASME Paper No. 82-WA/NCA-I, Presented at the ASME Winter Annual Meeting, Phoenix
- Shaw P P. 1979, *Developments in BEM-I* (Banerjee P K, Butterfield R, eds) . Applied Science, London; 121—153
- Sih G C, Loeber J F. 1969, *Quart. Appl. Math.*, **27**, (2): 193
- Sih G C, ed. 1977, *Elastodynamic Crach Problems*. Noordhoff International Publishing, Leyden, The Netherlands
- Spence D A. 1973, in: *Nonlinear Elasticity* (R W Dickey, ed) . Academic Press, New York; 365—396
- Talbot F M. 1982, Ph. D. Thesis, University of Nottingham
- Taylor G I. 1942, British ministry of Home Security, Civil Defense Res. Comm. Rep. RC329
- Thompson D O, Chimenti D E. 1986, *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*. Plenum, New York
- Thompson R B. 1983, *J. Appl. Mech.*, **50**: 1191—1201
- Thompson W T. 1950, *J. Appl. Physics*; 89
- Ting T C T (丁启财) . 1969, *J. Appl. Mech.*, **36**: 203—211
- . 1971, *ibid.*, **38**: 441—447
- , Mukunoki I. 1979, *ibid.*, **46**: 329—336
- . 1980, *Appl. Mech. Rev.*, **33**: 1629—1635
- . 1986, *Appl. Mech. Update*
- Varadan V J, Varadan V V, eds. 1980, *Acoustic Electromagnetic and Elastic Wave Scattering Focus on the T-Matrix Approach*, Pergamon, New York
- Wang X D, Ya T X. 1992a, *Acta Mechanica Sinica*, **8**: 51—60
- . 1992b, *ibid.*, **8**
- Wilkin N L. 1977, *Proc. CFMT*, Hong Kong; 21
- Wood E R, Phillips A. 1967, *J. Mech. Phys. Solids*, **15**: 241

Zukas C A, 等. 1981 (中译本1989). 碰撞动力学. 兵器工业出版社
杨桂通. 1984. 塑性动力学. 清华大学出版社
王礼立. 1985. 应力波基础. 国防工业出版社

THE PRESENT SITUATION AND THE TENDENCY OF THE RESEARCH ON ELASTOPLASTIC WAVES

Yu Tong-xi Su Xian-yue Wang Xiao-dong

Department of Mechanics, Beijing University (Peking University)

Abstract The research on elastoplastic waves is reviewed in this paper, and some important topics in the theoretical research on elastoplastic waves and the related engineering fields are discussed. The tendency of the research on this field is outlined.

Keywords *elastic waves; plastic waves*

(上接第 418 页)

像的分析要求降低, 所以我们预计这种技术可以扩展到包含几百甚至几千帧的数据的测量。尤其是推广到矢量场的电影记录, 立体照相记录, 以及全息照相记录, 并且因为处理时间减少的, 这种技术将变得越来越普遍。

询问技术将继续得到发展, 尽管 2 维相关技术及 2 维快速 Fourier 变换技术已经相当完善, 以致在数据的产生及数据的可靠性方面已不再期待作重大的改进。目前需要的工作是关于更详细地测量实际的流场, 发展高度可靠、速度变化很快的区域的询问方法。

粒子成像测速法提供的最受欢迎的能力之一是测量涡量场和应变率场。这些量同速度场本身一样, 都是流体力学的基本量。但是由于测量导数量非常困难, 这些量在实验工作者的词汇中, 几乎都被遗忘了。

参考文献 (101 篇, 略)

董苏华译自: *Ann. Rev. Fluid Mech.*, **23** (1991): 261—304. (吴宝根校)