

固体力学研究的趋向和良机 (IV)

——美国机械工程师协会应用力学分会
固体力学研究方向委员会的报告

8. 实 验 力 学

首席作者 R. J. Clifton

(Brown 大学工学院)

F. P. Chiang

(纽约州立大学机械工程系)

W. Knauss, E. Krempl 和 W. N. Sharpe, Jr. 对初稿提出了审阅意见。

提要 机器部件、构件和微电子元件的力学破坏，对人们的安全、可靠和生产有很不利的影响。防止这些破坏是固体力学的主要焦点，即通过分析、实验和计算来改进设计、制造和检验，以提供减少破坏所必要的根据。实验力学在这里起了关键作用，因为它提供了计算用的基本数据和检验所提出破坏理论模型的手段。实验力学当前的趋向表明，人们愈来愈多地采用光学方法来监测表面的位移、速度和应变。对于有害环境以及动态加载的物体来说，由于非接触方法的吸引力，上述趋向得以发展。激光技术的进展使这些方法便于实现。另一个趋向是由于采用了有计算机接口的伺服控制试验机而可以对更复杂载荷条件下的材料性能加以研究。还有另一个趋向是因为缺陷在破坏机理中很重要，人们加强了对缺陷如夹杂、裂纹、空洞等的注意。看来实验力学对未来作出贡献的机会是很大的，并且涉及范围广大的技术问题。未来研究的中心问题，看来是加强对微米尺度和小于微米尺度的测量，以进一步了解细观力学层次的材料响应和破坏。对缺陷、变形和残余应力的内部测量也将给以更多注意，因为它们对于加深对破坏的基本了解是重要的。自动化的数据处理和实验控制，将大大增加实验所得的信息及其对建立数学模型的用途。另外一些重要的研究方向，包括改进在现场测量岩石应力的方法，改进生物系统中位移和生理参数的测量，长期监测结构完整性的能力，以及改进用于力学系统反馈控制的传感器。

8.1 背景和研究趋向

据估计，机件、构件和电子元件的破坏，每年耗费美国 500—1000 亿美元。除了这些经

济损失之外，还有由于建筑物和桥梁的结构破坏，由于汽车、火车和飞机的力学破坏而带来的伤亡损失。生产率的损失更难以计量，但很清楚，这方面的损失是降低我们经济实力的一个重大因素。

防止由于断裂或极度变形引起的破坏，需要进一步了解材料对所加载荷的响应。增进这种了解是固体力学的主要焦点，它以分析、实验和计算来求得部件的局部破坏跟加载历史的关系。我们期望，通过改进设计、制造和检验来增进对破坏的定量的力学了解，从而减少破坏。实验力学对于确定预测和解释破坏所需要的有关材料响应、缺陷和残余应力的情况起着关键的作用。

在高速数字计算机和高效有限元算法出现之前，实验力学的一个重要方面是利用光弹性来确定分析解不能得出的不规则形状物体的应力。确定这些应力是减少破坏的第一步，可是，光弹性模型弹性响应的局限性妨碍了对延性材料破坏的详细分析。根据裂纹扩展和剪切带形成这样一些机理，在延性材料中非弹性变形是先于破坏而发生的。以往用光弹性模型研究的许多应力分析的问题，如今已用数字计算机更快、更经济和更详细地解决了。

适用于应力分析的力学方法而发展起来的专门技术，已转向发展更一般的光学方法来确定物体表面因加载而产生的位移、应变速度。由于激光技术进步的配合，加速了这些方法的发展。干涉测量和全息摄影的创新应用使我们得以研制出监测表面运动和变形的极有价值的方法。因为这些测量可用于实际材料，所以可以把它们直接跟基于材料响应的非弹性模型的数值计算进行比较。而且由于光学方法不需要跟变形物体直接接触，所以测量可在高温和高变形率下进行。这种测量对于建立可用于计算破坏的材料模型有不可估量的价值。

由于有计算机接口的伺服控制液压试验机的发展，材料的力学试验也发生了革命性的变化。应用这些试验机，精确控制载荷或位移，使一种材料经受复杂的加载过程就成为可能的了。循环加载已用于测定疲劳裂纹的扩展率。复杂的应力-时间历史以及非比例加载路径，已用来更好地了解结构金属的高温蠕变。应变率和温度对工程材料流动应力的影响，通过在某一给定加载历史过程中改变这些条件而得到了检验。由于更多的数据已从各种加载过程中得到，并从实验的数值仿真得到解释，对材料的非弹性响应的了解和模拟可期望有显著改进。

实验力学的另一个新方向，是更加注意了解缺陷在材料破坏中的作用。缺陷的探测，作为估计部件在工作条件下破坏的敏感性的第一步，随着以超声波衍射为基础的扫描和成像技术的发展，变得更加量化。监测材料损伤的演变的声发射技术也正取得进步。开展了在两种情况下测定裂纹扩展临界条件的实验。一种情况是裂纹顶端附近的非弹性区远小于其他特征长度的小尺度屈服，另一情况是裂纹顶端为大的塑性变形区所围绕。在试图建立满足一定抗断裂要求的材料细观结构设计基础的过程中，将破坏跟细观结构参数如晶粒尺寸、第二相粒子的间距等联系起来。动态断裂的研究导致了新的加载方法及监测裂纹扩展和裂纹顶端附近加载强度的新方法的发展。用图象显示裂纹顶端周围大变形区的光学方法，对于建立裂纹顶端速度与裂纹顶端加载强度之间的联系显示有巨大价值。随着人们注意力更集中于对破坏原因的了解，可以预期将会愈来愈注意探测缺陷和监测它们的扩展率。

8.2 未来的研究方向

实验力学的一个重要方向是微米和小于微米范围测量技术的发展。要从根本上了解塑性

和断裂, 需要测量各单个晶粒内部和跨晶粒界面发生的变形。要了解复合材料和二相合金的破坏, 需要了解跟裂纹从硬的脆性相扩展到软的延性相有关的微米尺度现象。空洞沿晶界扩散引起的蠕变是一种重要的破坏机制, 它需要小于微米尺度的分辨能力, 以便能直接把测量结果与根据细观力学模型的计算值加以比较。此外, 一切为改进薄膜电子器件的力学可靠性所必需的测量, 本来需要微米尺度或小于微米尺度的分辨能力。因此, 实验力学的未来研究中, 微米尺度和小于微米尺度测量的重要性便是毫无疑问的了。用电子显微镜下对受载试件中裂纹顶端周围位移场的测量已经开始, 可是, 要做的事还很多。

另一个重要的研究方向是发展探测不透明材料内部变形的技术。内部变形的知识对于从根本上了解材料的破坏是必不可少的。没有这些测量数据, 连宏观应力场都无法知道, 因为残余应力场仍是未知的。在许多应用(如焊接、多相材料、蒸发-沉积材料等)方面, 残余应力对于确定不同类材料界面附近的力学响应是头等重要的。此外, 对裂纹延伸和扩展以及空洞合并的内部测量, 是发展破坏模型的核心。实验力学界有机会利用从发展探测透明材料内部情况的光学技术所获得的经验, 在使用不可见辐射线探测不透明材料方面取得类似的进展。作为光双折射的声学“翻版”的声双折射, 应该在任何可能的地方予以发展和利用。类似地, 作为激光光斑方法的声学“翻版”的声斑方法, 也应在金属材料中的应用方面予以发展和评价。同步加速器辐射和毫米波辐射技术也需要加以考察。

在困难环境中的测量技术的研究, 是未来研究的另一个重要方向。在通常实验室的实验中遇不到的高温、低温、大变形率下的实验困难, 在包括金属成型、发电和碰撞等许多应用中却是重要的。光学方法正在这许多方面显示出应用前景, 但需要进一步予以发展。重点应该放在那些要求不与表面接触及对所观察表面如果需要预处理时尽可能少作处理的技术。对适用于温度 500°C 以上恶劣环境中二轴连续应变测量的传感器的研究, 可能对提高发电厂和推进系统的效率有巨大贡献。现场技术对监测如人造卫星、桥梁和核反应堆这类装置的长期完整性是需要的。

实验力学总的未来研究的一个方面是需要增加数据处理和实验控制的自动化, 把模拟信号(包括干涉仪记录)转换成供数字计算机处理的数字信号, 是缩短数据处理所花时间的必不可少的第一步。为了监测如挤压之类连续过程, 这种数据处理必需是实时的以利于过程的控制。从扫描探针的输出获得缺陷和残余应力场的图象显示, 是一个大规模的计算问题, 看来得用超巨型计算机才能有效地完成。

这里叙述的实验力学研究的方向, 对于改进构件和机件抗破坏的性能是必要的。事实上, 实验力学对所有固体力学研究领域都大有贡献。由于需要搞清楚分析中提出的关键问题而促使提出的恰当实验, 为发展更完善的理论提供了重要的深刻认识。对实验力学研究的进一步需要, 参见本文集的其他文章。

8.3 需要开展研究项目一览

实验力学研究的最优先领域包括如下各项:

- 微米和小于微米尺度的测量 微电子器件; 破坏的细观力学模型; 电子显微镜。
- 内部测量 缺陷的尺寸和形状; 残余应力场; 基于不可见辐射线的光学方法的声学“翻版”。
- 恶劣环境中的测量 高温; 低温; 磁场; 等离子体; 腐蚀环境; 无接触测量; 温度

500°C以上二轴应变的连续测量。

• 大应变率下的测量 剪切带形成过程中剪应变率和温度的测量；受冲击载荷结构物的表面运动；极大应变率下的材料响应；动态断裂。

• 自动化数据处理 模拟-数字转换；计算机接口；过程的实时控制；缺陷图象显示；超巨型计算机的使用。

• 当地应力和岩石性质的现场测量 通过水力压裂增加石油和天然气回采所需要的测量以及采矿与地震工程中的重要应用。

• 本构关系的确定 温度、应变率和非比例加载的影响；大应变；各向异性；应变软化；蠕变和松弛；疲劳；细观尺度响应。

• 生物系统的测量 人体中位移和生理参数的测量；植物中类似的测量。

• 结构物完整性的长期监测 地下结构物的衰坏；卫星和空间站；水下和近海结构物；核反应堆；用于力学系统控制的传感器；宇宙空间结构物的反馈控制；机器人和程序系统；温度和大的三维位移和转动的无接触测量；接触力的遥感测量。

杜碧云译自：*Appl. Mech. Rev.*, **38**, 10 (1985) : 1279—1281. (俞稼繁校)

8.4 参考书目

- ASTM (1965). *Fracture toughness testing and its applications*. ASTM special tech publication no 381, Am Soc for Testing and Mat, Philadelphia.
- Cheng, F P (Ed) (1982). Special issues: Coherent and incoherent optical techniques in experimental mechanics. *Opt Eng* 21 (2 and 3).
- Erf, R K (Ed) (1974). *Holographic nondestructive testing*, Academic, New York.
- Exp Mech, J Soc Exp Mech*.
- Kobayashi, A K (Ed) (in press). *Handbook of experimental mechanics*, Soc for Exp Mech.
- Lagarde, A (1981). *Optical methods for mechanics of solids*, proc of IUTAM symposium, Univ of Poitiers, France, Sijthoff and Nordhoff, Groningen.
- Metals handbook, vol 8: Mechanical testing* (1985). 9th ed, Am Soc for Metals.
- Rhode, R W, and Swearingen, J C (Eds) (1986). *Mechanical testing for deformation model development*, ASTM STP 765, Am Soc for Testing and Mat, Philadelphia.
- Structural integrity (1980). Selected papers from Conference on Struc Integrity Tech. *J Eng Mat Tech* 102, 2-63.

9. 计算力学

首席作者 A. Needleman

(Brown 大学工学院)

对初稿的审阅意见，由K. J. Bathe, T. Belytschko, P. R. Dawson, W. Herrmann, T. J. R. Hughes, J. T. Oden, M. Ortiz, O. Richmond, C. F. Shih, J. H. Weiner, M. L. Wilkins和K. J. William提供。

提要 计算方法在固体力学中起着关键作用。它是模拟各种基本力学行为的一种方法，是把这种改进了的模拟能力转变成新的工程工具的一种媒介，是把这些工具应用于工程实践的一种手段。现代计算方法能将力学系统的符合实际的模型加以系统地表达而不管是否容易得到分析解。日益增大的计算能力也是发展更精确的理论的一个动力，因为它使得用这些理论来解决复杂的工程问题成为可能。

9.1 背景和研究趋向

计算固体力学是一门相当新的学科，它使力学系统和结构系统的分析和设计发生革命性