



非均质材料的力学国际研讨会介绍

——纪念 J.P. Boehler 教授及其科学成就

郑泉水

清华大学工程力学系, 北京 100084

1 会议概况

非均质材料的力学 (Mechanics of Heterogeneous Materials) 国际研讨会于 1999 年 6 月 21 日和 22 日在法国 Grenoble 市举行. 出席者共有来自中国、法国、意大利、波兰、瑞士、西班牙、英国和美国的 70 多位学者. 会议上作了 27 个特邀报告. 组委会特别感谢了 J.-L. Chaboche(法)、C. Huet(瑞士)、S. Nemat-Nasser(美)、T. Onat(美)、A.J.M. Spencer(英)、J.R. Willis(英)、A. Zaoui(法) 和郑泉水(中) 的出席和演讲.

会议由法国 Grenoble 的 3S 实验室 (Laboratoire Sols Solides Structures) F. Darve 和 B. Loret 教授发起, 主要目的是纪念于 1998 年 7 月 2 日, 尚不到 57 岁就英年早逝的 3S 实验室 J.P. Boehler 教授. Boehler 是国际力学界的一个著名学者, 法国特级教授 (相当于英国皇家学会院士). 他对各向异性不可逆材料行为研究和应用在 70 年代末以来的发展作出了杰出的贡献; 他在长期重病缠身下完全献身于科学研究; 他对完美和对真理教徒般的追求和笛卡儿式的真诚, 为他赢得了学术界的尊敬和怀念.

为了纪念 Boehler, 当前固体力学界最具影响力之一的《Journal of Mechanics and Physics of Solids》已同意由 A.J.M. Spencer 和郑泉水在 2000 年编辑出版一期专门的文集, 以表达对 Boehler 的尊崇. 值得一提的是, 我国力学界先后有三位活跃的学者, 即清华大学的杨卫教授、郑泉水教授和哈尔滨工大的王彪教授自 1988 年以来多次访问 Grenoble 与 Boehler 合作, 取得了很好的合作成果. 会议的主题报告为 Spencer 所作的 "J.P. Boehler: The scholar

and his scientific achievements". 为完备起见, 本介绍也将该文译出附后.

2 非均质材料的力学国际研讨会学术方面的情况

会议分为非均质材料、地质材料、多晶材料和损伤力学四个专题. 就我的理解而言, 下面一些报告在会议上受到比较广泛地注意和讨论.

(1) 非线性有效性质估计方面: J.R. Willis 综述了多晶材料弹塑性屈服应力上下界估计的最新进展, 其主要方法是采用 Willis 所发展的 Hashin-Shtrikman 型变分框架, 通过适当选择出现在该变分框架的参考量, 得到了至今最好的上下界估计. 采用 Hill 增量或 Hutchinson 割线公式所进行的非线性估计, 一般导致超出严格上界的过于坚硬的估计; A. Zaoui 报告了一个可产生较“软”估计的方法, 并具体应用于多晶的有效粘塑性估计.

(2) 非均质材料方面: 针对颗粒材料, S. Nemat-Nasser 报告了一个建立在关于塑性应变率和偏应力的运动强化和摩擦诱导的非共轴性的现象学模型. J. Gril 关于树木纤维在生长过程和干燥 (死亡后) 过程中的性质, 在大量实验观察基础上的宏细观建模. C. Boutin 用均匀化方法, 研究了具有多重材料尺度的多孔介质的动力学行为, 表明一个本征尺度对动力学问题将起到重要的作用.

(3) 损伤力学方面: J.-L. Chaboche 介绍了复合材料在连续介质损伤力学框架下的初始和诱导的各向异性问题, 强调了对激活或非激活缺陷的描述, 虽然已有的模型看上去在数学和热力学上具有一致性, 但离问题的真正解决, 还有相当的困难. J. Betten、I. Carol 和 A. Dragon 应用张量函数表示来描述各向异性损伤及其演化.

(4) 非经典力学介质: 对于多晶材料塑性行为, L. Langlois 建议了一个两相带运动界面的非局部模型, 表明可以更好地描述单调多轴加载塑性和位错运动. P. de Buhan 用考虑剪切和弯曲刚度的纤维, 作为微极介质的源, 嵌入传统基体材料中, 由此将纤维增强复合材料看作为微极介质.

(5) 织构效应: 郑泉水报告了镍钛形状记忆合金板材马氏体变形的织构效应和建模. 表明无需凑任何材料参数, 仅在织构的实验观察基础上, 完全通过晶体学分析和细观力学方法, 就可以预测出与实验结果相当一致的冷轧方向拉伸平台现象和垂直冷轧方向拉伸无平台现象.

3 几点感想

材料, 尤其是固体材料均具有微结构, 并且往往具有多重微结构. 研究非均质材料和研究材料微结构对宏观性能的影响, 近 40 年来有着相当丰富的成果, 且吸引着越来越多的研究注意力. 但该领域至今依然有不少重要问题的解答有待于完善, 还敞开着更多的未知的重大问题. 如非均质材料的不变

性性质、上下界问题、有效非线性性质的估计、有效动力学性质的估计、尺度效应、织构效应、多重尺度耦合效应等等. 微结构演化是更加困难的问题.

在几乎所有上述问题中, 各向异性始终存在且扮演着重要角色. 如织构或微结构演化诱导的各向异性、多晶中单晶本身的各向异性、材料 (尤其是生物活体材料、智能材料) 优化所需要的特定各向异性、特定用途 (如负的可压缩性、负的温胀性) 所需要的各向异性.

因此, 我认为上述领域将在今后一段较长的时期内, 保持为固体力学主要前沿研究领域之一. 我国在非均质材料和各向异性问题研究方面, 清华大学、中科院力学所、哈尔滨工业大学等单位取得了很多成果, 不少成果具有很高的水平和国际影响力. 我们有条件通过加大研究力度, 进而取得更具影响力的成果.

此外, 非经典连续介质 (如非局部理论、微极或方向子理论、应变梯度理论) 的概念, 看来在研究非均质材料问题时有用武之地.

附录:

J.P. Boehler 及其科学成就

A.J.M. Spencer

我第一次与 Jean-Paul Boehler 相遇于 1976 年在 Delft 举行的 IUTAM 大会上. 引荐人为常到 Grenoble 作客座教授的华沙基础技术研究所的 Antoni Sawczuk. 我对 Antoni 相当了解. 他非常热心地提议我见一位来自 Grenoble, 在不变量理论方面正得到一些有趣结果的年轻学者. 我适时地与 Jean-Paul 见了面, 有了一次有趣的会谈, 发现我们有一些共同的研究兴趣. 此后, 他在我们交换论文抽印本的附信中, 有下面的一段话: “我对您在 Delft 愿与我见面仍怀感激之情. 您使我有机会在一些含混不清的问题上得到更多的信息. 我还要感谢您对我继续在表示理论领域的研究所给予的鼓励. ……” 我相信 Jean-Paul 仅仅是表现了他的礼貌, 但我高兴的是, 我显然没有给他泼冷水. 然而, 我得承认我慢慢地才看清我们所讨论过的工作的意义, 一段时间后才完全了解其重要性.

许多人将特别铭记 Jean-Paul 的, 是他从 1979 到 1987 年间组织了关于各向异性固体非弹性行为

方方面面的系列会议. 会议以不同的名义在 Villard-de-Lans 举行, 包括欧洲力学、CNRS 和 IUTAM. 我参加了四个会议中的三个, 特别是荣幸地在第一个会议上作了第一个大会报告. 这个系列会议, 通过把世界各地的相关领域的专家汇集一起, 从而对于各向异性材料的力学发展起到了重要作用. 其哲学思想, 在 1987 年会议的文集前言上作了优美的概括:

“天然材料 (如土壤、岩石和砂) 以及人工材料 (如金属、纤维增强复合材料和层合板) 具有天生的或变形诱导的定向微结构, 从而导致宏观行为上出现演化中的各向异性, 直至失效. 这种各向异性固体的非弹性行为, 包括屈服、损伤和失效, 在现代技术上是重要的, 因此吸引了在本构定律、分析方向、实验和设计方面不断增加的研究兴趣.

“各种类型的天然和变形诱导的各向异性, 以一种复杂的甚至难以理解的方式, 影响着发生在不同尺度上的不可逆现象, 并最终导致材料的失效. 直

到目前的该领域中的绝大部分工作，还是对特殊情况分别进行考虑，为描述各向异性现象的特定方面提出了各种特定的模型。此外，现有的大多数实验技术，还不能完整地适应于研究各向异性行为中一些复杂但可能重要的方面，导致理论模型常常难以得到实验的检验。显然，在研究这些多重因素的问题时需要更多的学科交叉和统一的研究。”

在该前言中 Jean-Paul 没有说到的是，这些会议是在 Villard-de-Lans 的 Grand 旅馆优美的环境、安静但令人兴奋的氛围中进行的。Jean-Paul 把会议组织得完美无缺、细致周到。我确信所有曾经与会的人，都希望再次具有这种令人兴奋和愉快的经历。这些会议也产生了四本正式出版的很有价值的文集，它们成了 80 年代非线性力学显著进展的永久记录。有时我们等待了很长一段时间才看到这些文集这一事实，现在看来已不重要了，它实际上正体现了 Jean-Paul 在他所做的每一件事情上追求完美的一种特征。

1987 年的会议也具有痛苦的一面。最初的建议是由 Jean-Paul 和 Antoni Sawczuk 作为共同主席的一个 IUTAM/ICM 研讨会。令人悲哀的是，Antoni 在他 1984 年 5 月访问 Grenoble 时过世了。Jean-Paul 的研究受到 Antoni Sawczuk 的强烈影响，他们是一对密切的朋友。Antoni 的过世深深地侵袭到 Jean-Paul 的心灵。这次研讨会成了纪念 Antoni 的会议，一个令人感动的献礼。

我的第二个记忆是以“张量函数在固体力学中的应用”为主题的 CISM 高等讲席班，由 Jean-Paul、Josef Betten、Ronald Rivlin 和我于 1984 年在 Udine 讲解，并于 1986 年在 Bad Honnef 重讲了一次。我记得 Jean-Paul 和 Ronald Rivlin 之间在 Udine 进行了多次长时间的讨论。观察两位杰出的具有雄辩口才的学者之间的争辩，是相当刺激的经历。虽然并不都同意，但却尊敬他们的观点。这些讲席班使 Jean-Paul 有机会把他的工作作一归纳并提炼出明确的观点，而由他撰写的讲义¹⁾中的几章，是各向异性材料力学极好的总结和导引。

在 1988 年夏天，Jean-Paul 亲切地安排我访问了 Grenoble 两个月。访问中我观察到他努力工作的能力、他的正直、他为他的研究生所花费的时间和精力、以及他对工作的奉献。我也感谢他的一些个人品质，对此稍后我还将说到一些。

本次会议的主要目的，是纪念作为一个科学家

的 Jean-Paul，我肯定这也是他所希望的。我将尝试以一种不充分的方式，概述他的科学成就，将集中于他的数学和理论方面的工作。尽管我知道他和他的学生们作了大量的实验研究（我理解其中的大量结果仍有待于发表），对此我留给比我更恰当的人士来评述。前面我已经提到过导致我们第一次接触的不变量和张量函数方面的工作。为了鉴赏和正确评价该领域的工作，知道一点相关的背景是有帮助的。为此，我将概述一下相关历史，但请熟悉的同事给予谅解。

最初对不变量理论作出显著贡献的学者中，有 Cauchy、Cayley 和 Sylvester，当然还有许多其他人。该主题在 19 世纪的数学中占据着非常显著的地位。以 Hilbert 所证明的著名定理为标志，不变量的经典理论在很大程度上完成于 20 世纪初。Hilbert 的该项工作记录在一些经典的教科书上。对这些古典数学家而言，其最初的动机是几何学上的；他们寻求与坐标系无关的几何物体的性质。当代对不变量理论兴趣的复兴，始自 1950 年代，其时认识到了不变性性质对于连续介质力学的意义，尤其是对于非线性理论公式化的重要性。这些发展开始于 Rivlin 和 Ericksen 的工作，他们率先明确地认识到如何一般性地将连续介质物理中的公式化问题，转换为不变量理论中的问题。接着有许多人在此方面进行研究，且至今仍然不断地有着进展。一个典型的问题可表述如下：给定一组二阶张量（对称或反对称的） A_R 和矢量 v_i ，试找到对所有正交张量 Q 都满足

$$\phi(QA_RQ^T, Qv_i) = \phi(A_R, v_i)$$

的标量函数 ϕ 的最小且完备的准确表达式。作为一个简单例子， ϕ 可以是一个自由能函数， A 为变形张量而 v 为温度梯度矢量。从而上述方程表达的含义为 ϕ 与物体的定向无关。类似的问题还可针对矢量和张量值函数，而不仅仅是标量函数。对于函数形式为多项式的问题的大部分，已在 1950 和 1960 年代得到了解决。然而，人们仍然希望移开多项式这一限制，因为如果许可采用一般性函数的话，就能够得到更为紧凑的结果。为了解决这一问题，有过几次尝试，但所得结果要么包含错误，要么包含冗余量，要么两者皆有之。我相信 Jean-Paul 在他发表于 1977 年的一篇短短的但决定性的论文中，第一次给出了正确的、不可约的不变量集合。随后当然有着进一步的发展，但它们全都发源于该文。

1) 译注：J.P. Boehler ed. Applications of Tensor Functions in Solid Mechanics. CISM Courses and Lectures - No.292. Wien: Springer-Verlag, 1987.

所有这些仅涉及各向同性张量表示, 而 Jean-Paul 职业生涯的绝大部分, 是致力于对各向异性非线性固体的理解. 在前面提到过的 CISM 讲义的前言上, 他写道: “由于形成过程和制造程序 (如晶体排列、层化、纤维化、孔隙化等), 或永久变形 (如各向异性强化或软化、蠕变、内部损伤生长等) 而导致材料具有定向内结构. 描述这类材料的力学行为, 要求具有恰当的数学模型. 以张量为变量的张量值函数的性质, 构成了对复杂材料行为进行一致性的数学建模的理性基础.”

通过引入结构张量概念, Jean-Paul 对模拟各向异性行为作出了显著的贡献. 结构张量刻划给定的各向异性类型, 从而使得各向异性张量函数可以由以结构张量作为附加张量变量的各向同性张量函数的结果构造出来. 这一想法曾隐含在某些较早的工作中; 例如, 它所基于的定理在 Weyl 于 1939 年出版的一本书中就有了. 但是, Jean-Paul 似乎第一个明确地表述了该原理并系统的将它应用于连续介质力学中 (它不止一次的被独立的重新发现). 由于存在许多类型的各向异性和大量的非线性力学行为, 该方法在建立基本数学结果和将之应用于连续介质力学与物理的具体问题这两方面开创了大量的活跃领域. Jean-Paul 在这两个领域中都很有活力, 他的许多学生和同事也是如此. 他们一起留下了大量的成果, 它们将会在可预见的将来形成各向异性材料非线性连续介质力学的一个数学基础. 关于对这些发展直到 1994 年的总结, 我建议参考郑泉水于 1994 年发表于《应用力学评论》的综述文章. 该文呈现的结果事实上对所有感兴趣的各向异性形式给出了矢量及张量的最小、不可约且完备的标量、矢量和张量函数集. 这些结果已经得到许多实际的应用.

至于 Jean-Paul 最近的研究, 我特别选出他与郑泉水的合作, 特别是他们在“材料对称性的描述、分类和真实性”上的工作. 该结果回溯到对力学和物理中的各向异性的基本理解, 以及它们的数学描述. 它澄清了材料和物理对称性的基本概念和对称群在描述各向异性时的地位, 同时推广了经典不变量理论中的一些重要定理. 我认为该研究指引了一条对各向异性材料的连续介质力学和物理进行统一

和理性描述的途径, 并且我确信它在未来会被经常引用. 我在这一成就中有特别值得高兴之处, 因为我在使 Jean-Paul 和泉水一起进行这项富有成果的合作中起了一小部分作用, 可惜该合作在它彻底完成前被中断了.

在这些评论中, 我一直集中于 Jean-Paul 在发展张量表示理论的工具中的奠基性贡献, 因为我相信他将主要因为这些贡献而被人们所铭记. 但是, 像所有好的应用数学一样, 他的成果从来不会过于抽象, 并且总是与它的应用保持联系. 这些成果的最终目标是发展实用的工程方法. 当然, 他亲自致力于许多这样的应用, 并且他的发表物包含了许多对诸如塑性、地质力学和损伤力学等的具体问题的应用. 因篇幅所限, 我不打算罗列他在这些方面的贡献, 就让事实本身来说话吧.

在 Jean-Paul 的才能之外, 他作为一个科学家的杰出品质是他的完整性. 他以极大的耐心和精确度进行工作, 从来没有回避过或敷衍过困难问题. 他以无懈可击的逻辑进行清晰而准确的思维, 并且以同样的清晰度写作. 这些品质使得他成为一个可怕然而有刺激性的辩论对手. 他的唯一目标是达到科学真理, 不允许有任何事情阻挡它. 他的一生都贡献给了他的研究工作.

作为一个普通的人, 我发现 Jean-Paul 总是热情、慷慨、体贴且能体谅别人. 他以他朴素和不做作的方式对我的妻子和我在我们访问 Grenoble 期间显示了极大的关心. 就我所知, 疾病对他造成严重的摧残, 但他绝少提起. 他接受了他的疾病且以我们不得不敬佩的方式与之作斗争, 他勤奋地进行研究工作并有效地安排以弥补由于治疗而失去的时间. 他非常依恋在 Alsace 和 Strasbourg 的根, 时常眷恋地提起该地区.

Jean-Paul 去世时, 作为一个科学家正值盛年, 我相信如果能长寿一些, 就会作出更多的贡献. 不过有许多不朽的科学成果会使我们铭记他的贡献, 并且其他人会在他所建立的基础上完成他未竟的事业.

(郑泉水、牡丹旭译自 A.J.M. Spencer, J.P. Boehler: The scholar and his scientific achievements)